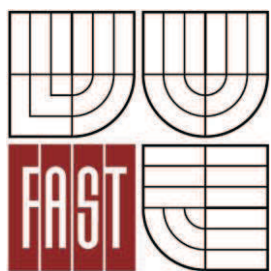




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A
DÍLCŮ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND
COMPONENTS

OVĚŘENÍ MOŽNOSTÍ PRO ZVÝŠENÍ TEPELNĚ- IZOLAČNÍ SCHOPNOSTI PĚNOVÝCH PLASTŮ

VALIDATION OPTIONS FOR INCREASING THE THERMAL INSULATING PROPERTIES OF
FOAM PLASTICS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. VOJTĚCH SMUTNÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. RNDr. Ing. STANISLAV ŠŤASTNÍK, CSc.

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant	Bc. VOJTĚCH SMUTNÝ
Název	Ověření možností pro zvýšení tepelně-izolační schopnosti pěnových plastů
Vedoucí diplomové práce	prof. RNDr. Ing. Stanislav Šťastník, CSc.
Datum zadání diplomové práce	31. 3. 2012
Datum odevzdání diplomové práce	11. 1. 2013
V Brně dne 31. 3. 2012	

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

Davies, Morris, G., Building Heat Transfer, John Wiley 2004

Kupilík, V., Závady a životnost staveb, GRADA Publishing 1999

Halahyja, M., Stavebná tepelná technika, akustika a osvetlenie, ALFA Bratislava 1986

Firemní literatura tepelně-izolačních materiálů (BACHL, STYROL, CELIX, SILVER PLASTICS aj.)

Zásady pro vypracování

Novodobé tepelné izolace vynikají vysokou účinností a nižší materiálovou náročností při výrobě oproti současným tepelným izolačním materiálům používaných ve stavebnictví. V současné době jsou zkoumány další možnosti zvýšení tepelně-izolační účinnosti, neboť jejich použitím lze dosahovat menší celkové tloušťky izolační vrstvy.

V této souvislosti sestavte:

- 1) přehled používaných tepelných izolací v klimatických podmínkách České republiky,
- 2) popište jevy související s mechanismy šíření tepla vypěněnými plasty, případně vymezte míru projevu jednotlivých složek šíření tepla,
- 3) sestavte přehled používaných experimentálních metod pro stanovení tepelně-izolačních vlastností izolačních materiálů,
- 4) porovnejte výsledky měření na vzorků pěnového polystyrénu s přísadami vybraných látek, kterými lze ovlivnit / snížit hodnotu součinitele tepelné vodivosti,
- 5) vymezte podmínky použití modifikovaných izolačních materiálů ve stavebnictví s ohledem na další předpokládané změny materiálových vlastností,
- 6) zhodnoťte efektivitu modifikací pěnového polystyrénu při jeho výrobě s ohledem na dosažené fyzikální vlastnosti.

Obsah diplomní práce by měl zhodnotit použitelnost izolací na bázi pěnových plastů při zabudování ve stavbě za podmínek klimatu ČR.

Při vypracování diplomní práce dbejte zásad platných na FAST VUT Brno; celkový rozsah práce asi 60 stran.

Předepsané přílohy

.....
prof. RNDr. Ing. Stanislav Šťastník, CSc.
Vedoucí diplomové práce

Abstrakt

Diplomová práce je věnována studiu materiálových vlastností vybraných druhů pěnového polystyrénu, zejména projevu součinitele teplotní délkové roztažnosti. Práce obsahuje dvě hlavní kapitoly, teoretickou a praktickou. V teoretické části se práce zabývá přehledem používaných tepelných izolací v podmínkách České republiky, popisu jevů, které souvisejí s mechanismy šíření tepla a přehledem používaných experimentálních metod pro stanovení tepelně-izolačních vlastností. V praktické části jsou uvedeny výsledky měření vzorků s pěnovým polystyrénem, které jsou modifikovány přidáním vybraných látek. Dále je v práci popsán strojový program, který slouží k výpočtu teplotního průběhu v konstrukci při oslunění.

Klíčová slova

Tepelné izolace, pěnový polystyrén, šíření tepla, teplotní roztažnost, konstrukce měřícího zařízení pro stanovení teplotní kontrakce, projevy oslunění.

Abstract

The thesis is devoted to the study of material properties of selected types of polystyrene, especially expression of the coefficient of linear thermal expansion. The work contains two main chapters, theoretical and practical. The theoretical part of the thesis deals with an overview of the thermal insulation in the Czech Republic, the description of phenomena related to heat transfer mechanisms and an overview of experimental methods for determining thermal insulating properties. The practical part presents results of measurements of samples with foamed polystyrene, which is modified by the addition of selected substances. The thesis describes the machine program, which is used to calculate the temperature in during the construction arrangement under the sunlight load.

Keywords

Thermal insulation, polystyrene foam, heat transfer, thermal expansion, the construction of the measuring device for determining the thermal contraction, influence of insolation.

Bibliografická citace

SMUTNÝ, Vojtěch. *Ověření možností pro zvýšení tepelně-izolační schopnosti pěnových plastů*. Brno, 2012. Počet stran 67. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí diplomové práce prof. RNDr. Ing. Stanislav Šťastník, CSc.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY VŠKP

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané typ práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 10. 1. 2013

titul jméno a příjmení studenta

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně, a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 10.1.2013

.....
podpis autora
Vojtěch Smutný

Poděkování

Chtěl bych poděkovat zejména svým rodičům, kteří mě během celé doby studia podporovali a díky nim jsem mohl vypracovat tuto diplomovou práci.

Děkuji tímto také vedoucímu mé diplomové práce prof. RNDr. Ing. Stanislavu Šťastníkovu, CSc. za cenné připomínky a odborné rady, kterými přispěl k vypracování této diplomové práce.

V Brně, leden 2013

Vojtěch Smutný

Obsah

I.	Úvod	12
II.	Cíl práce.....	12
III.	Teoretická část.....	13
1	Přehled nejčastěji používaných tepelných izolací	13
1.1	Lehké silikátové hmoty	13
1.1.1	Liapor a beton z Liaporu	13
1.1.2	Perlit a perlitový beton	14
1.1.3	Pórobeton.....	14
1.2	Pěnové anorganické hmoty	14
1.2.1	Pěnové sklo.....	14
1.3	Pěnové organické hmoty	14
1.3.1	Pěnový polyetylén	15
1.3.2	Pěnový polystyrén – EPS	15
1.3.3	Extrudovaný polystyrén – XPS	15
1.3.4	Pěnový polyuretan – PUR	16
1.4	Vláknité hmoty	16
1.4.1	Minerální vlna	16
1.5	Tepelné izolanty z organických materiálů	17
1.5.1	Celulóza.....	17
1.5.2	Konopí a len	17
1.5.3	Sláma	18
1.6	Vakuová izolace.....	18
2	Pěnový polystyrén	19
2.1	Surovina	19
2.2	Výroba	19

2.2.1	Předpěnění	20
2.2.2	Meziuskladnění.....	20
2.2.3	Výroba bloků, desek a tvarovek	20
2.3	Vlastnosti polystyrénu	21
2.3.1	Tepelná vodivost	21
2.3.2	Tvarová stabilita	22
2.3.3	Pevnost v tlaku a tahu za ohybu	22
2.3.4	Dynamická tuhost.....	23
2.3.5	Změny rozměrů.....	23
2.3.5.1	Změna rozměrů vlivem dodatečného smrštění.....	23
2.3.5.2	Změna rozměrů vlivem teploty	23
2.3.5.3	Nasákavost	24
2.3.6	Odolnost proti stárnutí	25
2.3.6.1	UV záření a povětrnostní vlivy	25
2.3.6.2	Odolnost vůči chemikáliím	25
2.3.6.3	Biologické chování.....	25
2.3.6.4	Odolnost proti ohni.....	26
2.4	Značení polystyrénu a příklady jeho použití.....	26
3	Základní způsoby šíření tepla.....	27
3.1	Šíření tepla vedením	27
3.1.1	Ustálený teplotní stav	28
3.1.2	Neustálený teplotní stav	28
3.2	Šíření tepla prouděním.....	29
3.3	Šíření tepla sáláním.....	30
3.4	Planckův vyzařovací zákon	30
4	Přehled experimentálních metod pro stanovení tepelně izolační vlastnosti izolačních materiálů ..	31

4.1	Metoda desky	32
4.2	Metoda válce	32
4.3	Poensgenova metoda	33
4.4	Metoda nestacionárního tepelného toku	34
4.5	Metoda topného drátu	35
IV.	Praktická část	36
1	Popis programu SCHMIDT	36
2	Funkce IGLOB	38
2.1	Deklinace Slunce	38
2.2	Výška Slunce	39
2.3	Azimut Slunce	40
2.4	Úhel dopadu	41
2.5	Přímé sluneční záření	41
3	Měření teplotní délkové roztažnosti vzorků pěnového polystyrénu	44
3.1	Vyhřívání komory, návrh a popis konstrukce	45
3.1.1	Výpočet tepelné bilance vyhřívání komory	46
3.1.1.1	Použití vzorce obecně	47
3.2	Průběh měření	48
4	Výstup naměřených dat z vyhřívání komory	52
5	Kalibrace měřicí komory	54
5.1	Formulace vztahu pro výpočet délkové teplotní roztažnosti α	55
5.2	Přepočty naměřených hodnot podle odvozeného vztahu	56
6	Měření objemové hmotnosti a součinitele teplotní vodivosti λ	60
6.1	Výstup měření	61
V.	Závěr	63
VI.	Seznam použitých zdrojů	66

I. Úvod

Novodobé tepelné izolace vynikají vysokou účinností a nižší materiálovou náročností při výrobě oproti současným tepelným izolantům používaných ve stavbách. V současné době jsou zkoumány další možnosti zvýšení tepelně izolační vlastnosti, neboť jejich používáním lze dosahovat menší celkové tloušťky izolační vrstvy.

V praktické části se moje diplomová práce zabývá experimentálním sledováním a porovnáním výsledků vzorků pěnového polystyrénu z produkce firmy BACHL s.r.o. Brno z hlediska objemových, resp. délkových změn, při zabudování ve stavbě, které jsou vystaveny klimatickým účinkům vnějšího prostředí a oslunění. Jedná se o studium praktického problému, který se objevuje na stavbách při montáži vnějšího kontaktního zateplovacího systému ETICS. Negativní účinek teplotní kontrakce se projevuje zejména u vypěněných plastů, které obsahují vyšší podíl grafitových částic, jež způsobuje ztrátu koheze izolačních desek k podkladní lepicí maltě.

II. Cíl práce

Cílem této diplomové práce je sestavit přehled používaných tepelných izolací, především pěnového polystyrénu, v klimatických podmínkách České republiky, dále pak popis jevů, které souvisejí s mechanismy šíření tepla vypěněnými plasty, dále přehled používaných experimentálních metod pro stanovení tepelně izolačních vlastností izolantů a studium metody pro zjištění teplotní kontrakce s porovnáním výsledků vybraných druhů pěnového polystyrénu.

III. Teoretická část

Za tepelně izolační materiály jsou považovány všechny hmoty, které mají měrnou tepelnou vodivost v suchém stavu pod $0,175 \text{ W/(m.K)}$. Tepelná vodivost izolačních materiálů se stoupající vlhkostí silně stoupá, a proto je nutné, aby tyto materiály byly stále co nejsušší. Velmi dobré jsou ty materiály, které jsou nenasákavé a během výroby, zabudování a během používání nepřijmou vlhkost. Materiály, které jsou vyráběny mokrou cestou (malty, betony), se musí ihned po zabudování nechat řádně vyschnout. V opačném případě by hrozil pokles tepelně izolačních vlastností. V běžných podmínkách však žádný materiál nevyschne úplně, vždy zůstane ve stavu tzv. ustálené vlhkosti a jeho tepelně izolační vlastnosti jsou horší, než se zjišťuje na vysušených vzorcích[1].

Podle vlastního materiálu se tepelně izolační výrobky dělí na:

- lehké silikátové hmoty – lehká kameniva a lehké betony,
- pěnové anorganické hmoty – pěnové sklo,
- pěnové organické hmoty – pěnové plasty,
- vláknité hmoty – skleněná a minerální vlákna,
- tepelné izolanty z organických materiálů – celulóza, konopí, sláma, korek,
- vakuové izolace.

1 Přehled nejčastěji používaných tepelných izolací

1.1 Lehké silikátové hmoty

1.1.1 Liapor a beton zLiaporu

Lehké kamenivo z pálených expandovaných jíílů, například keramzit, u nás vyrábí ve Vintířově. Vyrobené pórovité kamenivo se třídí na několik frakcí, které se pak užívají pro výrobu izolačních betonů. Betony z Liaporu sepoužívají nejen v novostavbách, ale i při zlepšování tepelně izolačních vlastností starých domů v podobě čerpaných monolitických betonů i prefabrikovaných dílců[1].

1.1.2 Perlit a perlitový beton

Expandovaný perlit je materiál nehořlavý, lehký a má vynikající tepelně i zvukově izolační vlastnosti. Je odolný teplotám od -200°C do $+900^{\circ}\text{C}$. Tepelná vodivost sypaného perlitu se pohybuje kolem $0,05 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ [1].

1.1.3 Pórobeton

Nejrozšířenější tepelně izolační silikátovou hmotou u nás je pórobeton. Jeho vlastnosti sice nedosahují nejvyšších hodnot, avšak jeho dostupnost, snadné zabudování a cena jsou při rozhodování významné. Podle platné ČSN EN12602 je u nás zavedeno 6 základních druhů pórobetonu lišících se objemovou hmotností a pevností v tlaku. Součinitel tepelné vodivosti pórobetonu se pohybuje v rozmezí $0,15 - 0,22 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ [1][2].

1.2 Pěnové anorganické hmoty

1.2.1 Pěnové sklo

Drahým a proto méně rozšířeným izolačním materiálem je pěnové sklo. Vyrábí se ztavením směsi skleněných střepů a uhlí v uzavřených formách. V nově vzniklém materiálu se vytváří drobné bublinky, jejichž stěny jsou zcela uzavřené. Tím se docílí nehořlavosti a parotěsnosti. Pokud je materiál dlouhodobě zabudován ve vlhkém prostředí (např. v chybně provedených jednoplášťových střeších), může dojít ke zvýšení vlhkosti materiálu a tím k výraznému snížení tepelně izolačních vlastností. Součinitel tepelné vodivosti se pohybuje v závislosti na únosnosti mezi $0,040 - 0,050 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ [3][1].

Při pokládání se desky pěnového skla lepí k napenetrovanému podkladu horkým asfaltem, nebo se kladou na sucho na rovný podklad[1].

1.3 Pěnové organické hmoty

Možnost zpěňování některých plastů poskytla stavebnictví obrovské možnosti při jejich použití jako tepelně izolačních materiálů. Proti hutným plastům s objemovou hmotností kolem $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ se napěněním běžně dosahuje objemové hmotnosti pouze 15 až $30 \text{ kg}/\text{m}^3$, již odpovídá pórovitosti 97 až 98 %. Protože technologické napěňovací postupy lze

řídít tak, že se vytváří rovnoměrná pórovitá struktura s vhodnou velikostí pórů, jsou tyto materiály z hlediska tepelné izolační funkce bez konkurence [1].

Obecnou nevýhodou pěnových plastů bývá však hořlavost, nízká odolnost teplotě, objemové změny, někdy též otevřená pórovitost způsobující velkou nasákavost. Plasty jsou také málo odolné některým agresivním látkám, zvláště z oboru organické chemie, některé jsou málo odolné mikroorganismům a při jejich zpracování nebo i využívání se v některých případech uvolňují zdraví škodlivé anebo korozivní látky [4].

Pěnové plasty lze vyrobit z materiálů termoplastických i termosetických. Pěnové plasty vyráběné napěněním termosetů jsou déle známé, obecně levnější a snáze vyrobitelné. Většinou však mají otevřené póry a jsou tedy silně nasákavé, mají nízkou pevnost, poměrně velké objemové změny, menší životnost a bývají i větším nebezpečím z hlediska zdravotní závadnosti a koroze. Proto v poslední době jednoznačně převládají pěnové plasty z hmot termoplastických. Průmyslově je zvládnuta výroba pěnového PVC, pěnového polyetylenu, pěnového polyuretanu a pěnového polystyrénu [1] [4].

1.3.1 Pěnový polyetylén

Pěnový polyetylén (např. ETHAFOAM firmy DowChemical) proniká do stavebnictví jako materiál k těsnění dilatačních spár nebo spár mezi montovanými dílci a jako materiál k tlumení kročejového hluku v podlahách. Ve stavebnictví se používá především jako tepelně izolační materiál pěnový polyuretan, který se dá napěňovat přímo na staveništi a tak kopírovat i složitější tvary konstrukce. Nedostatkem tohoto materiálu je hořlavost a poměrně nízká teplotní odolnost [1].

1.3.2 Pěnový polystyrén – EPS

viz samostatná kapitola dále.

1.3.3 Extrudovaný polystyrén – XPS

Je tepelná izolace, která se od standardního bílého expandovaného polystyrénu liší jak způsobem výroby a vlastnostmi, tak i vzhledem a barevně odlišením podle výrobce. Díky protlačení pěny má extrudovaný polystyrén na rozdíl od expandovaného uzavřenou strukturu bez mezer. To dává XPS velmi dobré vlastnosti co se týče pevnosti v tlaku, minimální nasákavosti [1] [4].

Obecně se XPS rozděluje podle:

- pevnosti v tlaku (kPa) – XPS 200, 250, 300, 500, 700,
- povrchu – hladký, protlačovaný,
- profilu hran – rovný, polodrážka, pero + drážka.

1.3.4 Pěnový polyuretan – PUR

Nejkvalitnějším pěnovým izolačním materiálem je pěnový polyuretan. Tento polyuretan může být ve formě měkké pěny, která zlidověla pod názvem molitan. Jeho výroba je založena na adiční polymeraci polyizokianátů s vícemocnými alkoholy, která probíhá i za normální teploty. Objemovou hmotnost hotového výrobku lze měnit úpravou poměrů mechanických složek, čímž lze docílit rozmezí 30 až 80 kg/m³. U polyuretanů je nutno zmínit vyšší energetickou náročnost a produkci škodlivin během procesu výroby [5].

Ve stavebnictví se používá především tvrdá polyuretanová pěna. Jedná se o velmi dobrou tepelnou izolaci. Používá se ve formě desek či tvarovek, nebo se může aplikovat přímo na místě. Polyuretanové desky se uplatňují především jako tepelně izolační vrstvy do krovů, do plochých střech, nebo jako izolační vrstvy stěn. Polyuretan má dobrou odolnost proti běžným chemickým látkám a při hoření neodkapává [1] [5] [3].

1.4 Vlákenné hmoty

1.4.1 Minerální vlna

Minerální vlna je u nás po pěnovém polystyrénu druhou nejrozšířenější izolací. Vyrábí se tavením hornin, nejčastěji jde o čedič nebo křemen a další skelnou fázi vytvářející příměsi, kde může značný podíl tvořit také recyklát. Podle výchozích surovin se pak jedná o kamennou či skelnou vlnu. Díky čediči má kamenná vlna vysoký bod tání a proto dobře odolává ohni. Pojivem jsou nejčastěji fenol-formaldehydové pryskyřice, které někteří výrobci již nahrazují šetrnějšími a zdravotně nezávadnými alternativami. Desky jsou v celém objemu hydrofobizované, ale nelze je trvale vystavit vlhku[3][6].

Předností je jednoznačně odolnost vůči vysokým teplotám - používají se například v kombinaci s polystyrénem u panelových budov nad požárně dovolenou výškou nebo pro vytvoření požárních pásů. Další výhodou minerální vlny je její nízký difúzní odpor a tím vysoká paropropustnost. Díky této vlastnosti se minerální vlna často úspěšně používá ve

skladbách provětrávaných fasád, kde je požadována větší požární odolnost, nebo dvoupřísluš-
ťových střech [3] [7].

1.5 Tepelné izolanty z organických materiálů

1.5.1 Celulóza

Jedná se o tepelnou izolaci z celulózových vláken, která se vyrábí metodou recyk-
lace starého novinového papíru. Základní surovinou izolace je tedy dřevo. Výroba probíhá
nejprve rozemletím a rozvlákněním, čímž je získáno celulózové vlákno. Toto vlákno se
smíchá s přísadami zajišťujícími odolnost proti hnilobě, požáru a hlodavcům. Základními
používanými přísady jsou boritany, fosforečnan amonný, či síran hořečnatý, který je zdra-
votně nezávadný[6][8][4].

Celulóza se nejčastěji aplikuje pomocí strojního zařízení foukáním do připravených
dutin stěn nebo stropů. Podle různých způsobů aplikace, dosahuje celulózová hodnota mezi
 $0,035 - 0,042 \text{ W/(m.K)}$. Izolace má nízký difuzní odpor a zajímavá je také hodnota tepelné
kapacity, ta je oproti uměle vyráběným izolacím skoro dvojnásobná $c = 1907 \text{ J/(kg.K)}$.
Objemová hmotnost se pohybuje od 30 kg/m^3 pro volně loženou až po 70 kg/m^3 pro fou-
kání do vertikálních dutin. U nástřiků je to až 80 kg/m^3 . Nástřik celulózové izolace je mož-
né použít pro stěny v interiéru i exteriéru. Velkou výhodou celulózy je minimální potřeba
vstupní energie pro výrobu. Také slouží jako zvuková izolace, s čímž souvisí její míra
zhutnění[6][8].

Celulóza je zatím více využívána v zahraničí, a to převážně v dřevostavbách a pa-
sivních domech.

1.5.2 Konopí a len

Konopí patří mezi velmi využívané technické rostliny. Jeho největší předností je
rychlá obnovitelnost. Roste o mnoho rychleji, než dřevo a nevyžaduje žádnou velkou péči
ani ošetřování chemickými látkami. Z vláken této rostliny jsou vyráběny konstrukční desky
i tepelně-izolační materiály ve formě desek či rouna. Pro izolaci těžce přístupných nebo
nepravidelných míst je používána konopná foukaná sypká izolace[3].

Díky srovnatelným izolačním vlastnostem mohou konopné materiály nahradit mine-
rální vlnu. Výhod u používání konopí je hned několik. Uchovávají si dlouhodobě své

vlastnosti, jsou pevné, nehrozí zde napadení škůdci či hnilobou a jsou odolné proti vlhkosti. Zaručují zdravé mikroklima, a tedy příjemné bydlení. Obdobné vlastnosti, ale zatím menší rozšíření, mají izolační materiály z dřevitých vláken a technického lnu. Všechny tyto výrobky lze považovat za čistě ekologické, neboť při jejich výrobě nejsou používána žádná lepidla. Mají vysokou tepelnou kapacitu $c = 2100 \text{ J/(kg.K)}$, díky níž se v horkých letních měsících nepřehřívají a účinkují současně jako tepelně-akumulační materiál[3].

1.5.3 Sláma

Obliba slaměných balíků jako tepelné izolace v poslední době roste. Používá se u ekologických staveb, často v kombinaci s dalšími přírodními materiály. Fyzikální vlastnosti závisí z velké části na kvalitě a objemové hmotnosti slaměných balíků. Obecně je u slámy v porovnání s průmyslovými izolacemi potřeba počítat s vyšší prachností vzhledem k rozměrové nerovnosti balíků a s tím spojeným vycpáváním [3][8].

Slámu lze použít buď v kombinaci s nosnou stěnou, nebo může sama sláma sloužit jako nosná konstrukce. Izolace má ve spojení s hliněnou omítkou požární odolnost až 90 minut, a proto vyhovuje pro všechny typy konstrukce. Velmi důležité je oddělení balíků od všech zdrojů vlhkosti omítkou nebo obkladem[3].

Zvláštní vlastností tzv. „živých izolací“, rozumí se tepelné izolace na přírodní bázi, je to, že do buněčné struktury váží vlhkost a transportují ji. V praxi to znamená, že celulóza funguje jako savý papír, který je schopen vlhkost pohltit. Ta se neshlukuje, ale je rovnoměrně rozložena v izolaci[8][3][6].

1.6 Vakuová izolace

Vakuové izolační panely, které jsou označovány zkratkou VIP, však obsahují jako výplň tuhovou síťovou strukturu složenou z klastrů (shluků) částic oxidu křemičitého. Součástí VIP je vzduchotěsný a mechanicky tuhý obal, který umožní úplné a trvalé odčerpání vzduchu z výplně SiO_2 i bezporuchovou manipulaci s panely při výstavbě. Panely VIP se vyrábějí v rozměrech stavebních izolačních desek, jejich tloušťka je, od 2 do 8 cm[3].

U nás se používá velmi zřídka zejména kvůli vysoké ceně. Vakuové panely nachází uplatnění zejména při řešení komplikovaných konstrukčních detailů např. při zaizolování roletového boxu atd. V zahraničí jsou však i realizace, kde byla provedena kompletní izolace domu pomocí systému vakuových panelů - fasáda, střecha, podlaha[4][3][7].

2 Pěnový polystyrén

Pěnový expandovaný polystyrén (EPS), je stále nejrozšířenějším tepelným izolantem, bez něhož není v současné době možné energeticky hospodárné stavění. Izolační desky z pěnového polystyrénu si v průběhu uplynulých několika desítek let získaly na stavbách své pevné místo. Pěnový polystyrén se dá lehce zpracovat, má výborné tepelně izolační vlastnosti a je cenově dostupný.

Aby bylo možné pěnový polystyren optimálně využít, je nutná znalost jeho vlastností, které jsou blíže popsány v následujících podkapitolách[4][9].

2.1 Surovina

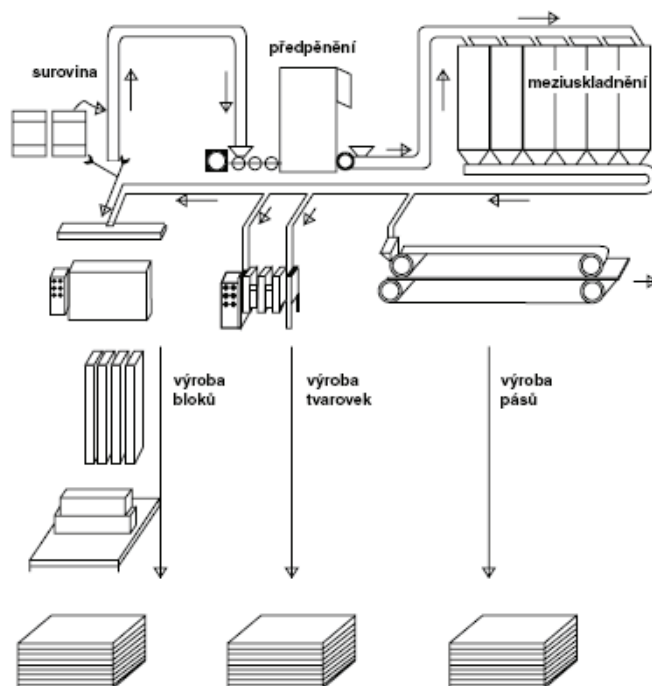
Základní surovinou pro výrobu pěnového polystyrenu je zpěňovatelný polystyrén ve formě perlí, obsahujících zpravidla 6–7 % nadouvadla. Perle se vyrábějí suspenzní polymerací monomeru styrenu a jsou dodávány výrobcům pěnového polystyrenu v několika velikostních skupinách od 0,3 do 2,8 mm, v závislosti na konkrétním použití.

Styren i pentan jsou látky, které se běžně vyskytují v přírodě – styren lze nalézt i v mnoha potravinách a pentan se v přírodě vytváří ve značném množství na příklad v zažívacích systémech zvířat nebo při rozkladu rostlinného materiálu působením mikroorganismů. Obě tyto látky se pro průmyslové využití vyrábějí z ropy [9].

2.2 Výroba

Výroba pěnového polystyrenu probíhá v zásadě ve třech stupních:

- předpěnění,
- meziuskladnění,
- výroba bloků, desek a tvarovek.



Obr.1 Postup výroby pěnového polystyrénu [9].

2.2.1 Předpěnění

Zpěňovatelný polystyrén se předpěňuje pomocí syté vodní páry v předpěňovacích zařízeních. Při tomto procesu granule zvětší svůj objem na dvacet až padesát násobek původního objemu. Výslednou sytnou hmotnost udává teplota vodní páry a doba jejího působení na perle. Tato sytná hmotnost musí být stejná jako požadovaná objemová hmotnost vyráběného EPS. Ta se zpravidla pohybuje mezi 10 a 35 kg/m³ a má velký vliv na většinu vlastností konečného výrobku [9].

2.2.2 Meziuskladnění

Tento proces probíhá v provzdušňovaných silech. V čerstvě vypěněných perlích se totiž během chlazení vytvoří podtlak, způsobující vysokou citlivost perlí na mechanické poškození a znemožňující jejich bezprostřední další zpracování. Difusí vzduchu do buněk perlí se podtlak vyrovnává, perle získávají větší mechanickou pružnost a zlepšuje se jejich další zpracovatelnost. Perle se současně i suší [9].

2.2.3 Výroba bloků, desek a tvarovek

Předpěněné a vyzrálé perle nyní mohou být různými způsoby zpracovány na konečné výrobky [9].

Jsou to především:

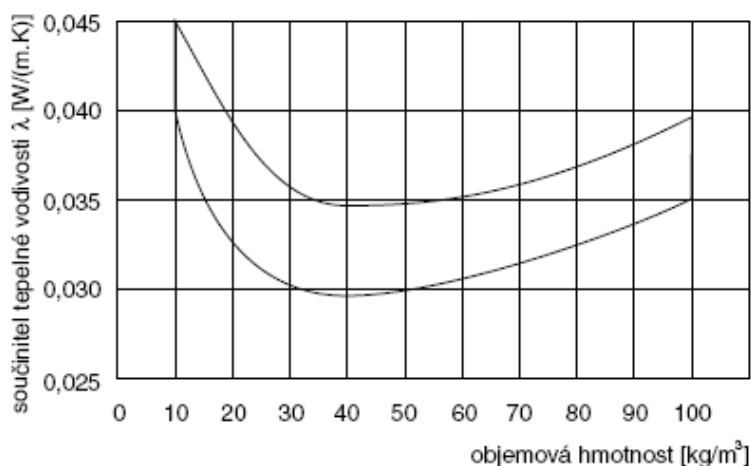
- výroba bloků, následně řezaných na desky (tepelně izolační, drenážní, elastifikované proti kročejovému hluku) nejčastěji,
- výroba jednotlivých tvarovek pomocí automatů na výrobu tvarovaných dílců (desky perimetr, obaly, tvarovky pro ztracené bednění a podobně)

2.3 Vlastnosti polystyrénu

2.3.1 Tepelná vodivost

Vynikající tepelně izolační vlastnosti EPS spočívají v tom, že jeho struktura je tvořena mnoha uzavřenými buňkami tvaru mnohostěnu, obsahujícími vzduch, který má, jak známo, pouze nepatrnou tepelnou vodivost. Pěnová hmota se skládá asi ze 2 % polystyrenu a 98 % vzduchu. Skutečnost, že buňky obsahují vzduch, způsobuje, že se tepelně izolační vlastnosti EPS s časem nezhoršují jako u řady jiných pěnových hmot, obsahujících jiné plyny[9].

Součinitel tepelné vodivosti závisí kromě jiného na objemové hmotnosti. Nejnižší součinitel tepelné vodivosti je při objemové hmotnosti mezi 30 a 50 kg/m³, směrem k nižším i vyšším objemovým hmotnostem součinitel stoupá - viz Graf 1. Protože se v praxi používá EPS v rozsahu objemových hmotností 8 až 40 kg/m³, znamená to, že se vzrůstající objemovou hmotností součinitel tepelné vodivosti klesá [9].



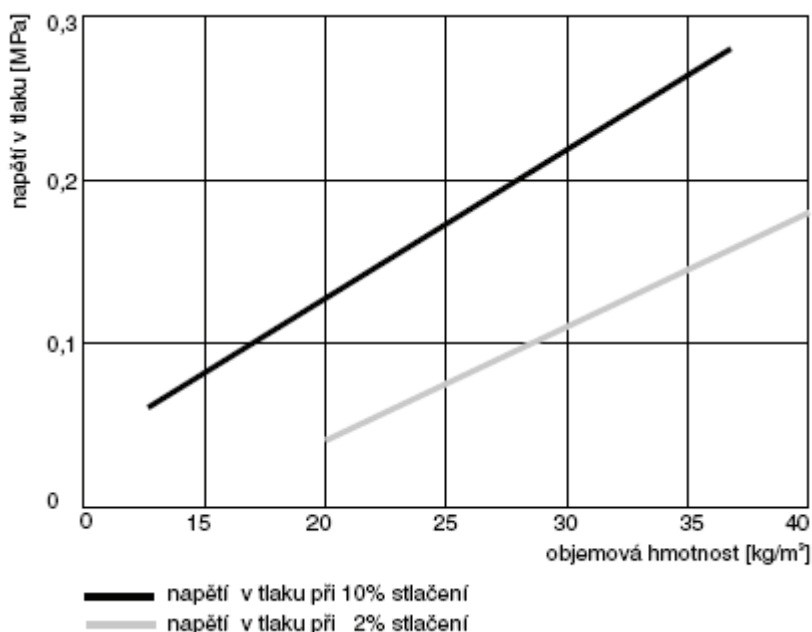
Graf 1 Závislost objemové hmotnosti na hodnotě součinitele tepelné vodivosti pěnového polystyrénu EPS [9].

2.3.2 Tvarová stabilita

Maximálně přípustné teploty pro použití pěnového polystyrenu závisí stejně jako u všech termoplastů na době a na velikosti působících teplot. Bez dodatečného mechanického zatížení snese pěnový polystyren krátkodobé teploty do 100°C. Vlivem nepatrné tepelné vodivosti polystyrenu zůstává hloubka průniku vysokých teplot relativně malá, což působí tím příznivěji, čím má EPS větší tloušťku. Pokud je mechanicky zatěžován, pak činí jeho dlouhodobá teplota pro použití v závislosti na objemové hmotnosti mezi 75°C a 80°C. Pěnový polystyren je materiál, u něhož nedochází za teplot mezi 80°C a -180°C k žádným podstatným změnám struktury, proto mu nevadí ani velice nízké teploty pro trvalé využití [9].

2.3.3 Pevnost v tlaku a tahu za ohybu

Důležitou vlastností EPS je jeho pružná a trvalá deformace při zatížení tlakem. Měřítkem toho je napětí v tlaku, potřebné ke stlačení zkušební vzorku o 2 %, nebo o 10 %. Jako základní údaj o schopnosti EPS odolávat působení tlaku se používá hodnota napětí v tlaku při 10% stlačení, měřená dle ČSN EN 826. Hranice pružné deformace EPS je dosaženo při stlačení o 2–3 %, takže hodnota napětí při 2% stlačení udává maximální zatížení tlakem, pro které se materiál po odlehčení vrátí na původní rozměr. Jak napětí při 2%, tak při 10% stlačení roste se vzrůstající objemovou hmotností téměř lineárně - viz Graf 2 [9].



Graf 2 Vliv objemové hmotnosti na pevnost v tlaku při 2 % a 10 % zatížení [9].

Další důležitou mechanickou vlastností je pevnost v ohybu, stanovovaná podle ČSN EN 12089, důležitá pro manipulaci a zpracování desek EPS a dále pevnost v tahu kolmo k rovině desky, která se měří dle ČSN EN 1607 a je velmi důležitá při použití EPS ve fasádních zateplovacích systémech. Obě tyto vlastnosti rovněž rostou s objemovou hmotností [9].

2.3.4 Dynamická tuhost

Desky z EPS mají ve srovnání s jinými izolačními materiály díky své buněčné struktuře značnou tuhost. Tato vlastnost je výhodná u aplikací, kde je vyžadována minimální deformace při zatížení, avšak stává se nevýhodou v případech, kdy jsou vyžadovány zvukově izolační vlastnosti, jako je útlum kročejového hluku u plovoucích podlah nebo vzduchová neprůzvučnost u fasád. V těchto případech je naopak žádoucí nízká dynamická tuhost. Dynamická tuhost se měří podle ČSN EN 29052-1 a závisí na tloušťce desky a na typu EPS [9].

2.3.5 Změny rozměrů

2.3.5.1 Změna rozměrů vlivem dodatečného smrštění

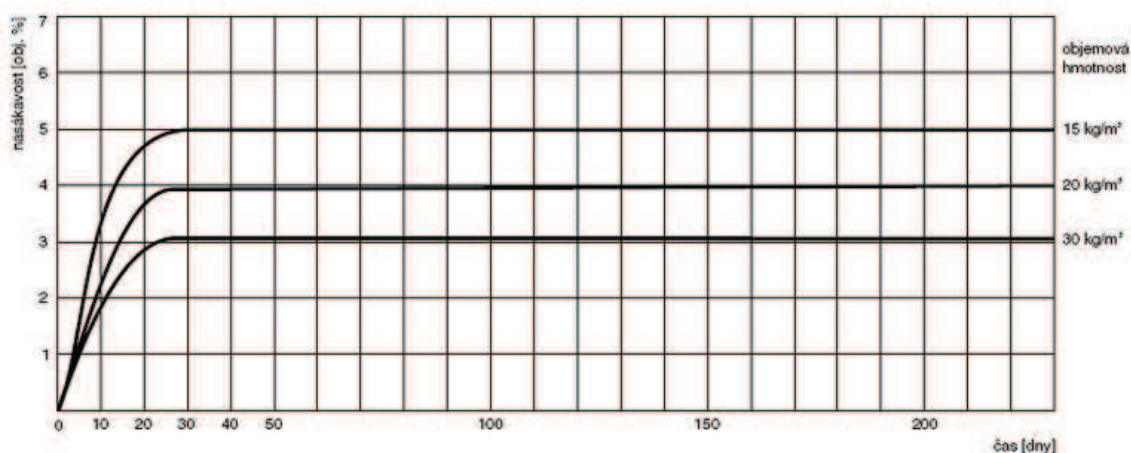
Jako dodatečné smrštění se označuje kontrakce EPS působením zbytkového vnitřního pnutí v materiálu po jeho vypěnění. Tato dodatečná změna rozměru dosahuje celkem asi 0,2–0,4 % a závisí na technologických podmínkách při výrobě a na typu materiálu. Zpočátku probíhá rychle, pak stále více odeznívá, až se zastaví na konečné hodnotě rozměru. Větší část těchto změn proběhne ve výrobním závodě ještě před řezáním desek, takže desky opouštějící závod vykazují minimální změnu rozměrů [9].

2.3.5.2 Změna rozměrů vlivem teploty

Koeficient teplotní roztažnosti pěnového polystyrenu činí $(50 \div 70) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Na teplotní roztažnost je třeba brát zřetel především při kotvení větších souvislých ploch jako jsou rozměrné střechy a fasády domů. Kotvení musí přenést smykové síly vzniklé teplotní roztažností tak, aby se roztažnost desek projevila pouze deformací buněčné struktury [9].

2.3.5.3 Nasákavost

Protože pěnový polystyren není rozpustný ve vodě a má uzavřenou buněčnou strukturu, nepohlcují buňky ve své struktuře téměř žádnou vodu. K tomu může docházet do určité míry jenom v pórech mezi vzájemně svařenými částicemi pěnové hmoty. Tento fakt způsobuje, že se tepelně izolační ani mechanické vlastnosti EPS významně nemění ani při dlouhodobém působení vody, navíc po vysušení se hodnoty vracejí na původní velikost, zatímco u řady jiných izolačních materiálů dochází i při krátkodobém působení vody k přechodné nebo nevratné ztrátě izolační schopnosti.



Graf 3 Průběh nasákavosti pěnového polystyrénu s různou objemovou hmotností při uložení pod vodou [9].

Na rozdíl od vody může vodní pára, která je obsažena ve vzduchu jako vlhkost, procházet stěnami buněk a tím i vrstvou izolace EPS. Rychlost difuze vodních par je dána difuzní tloušťkou, která závisí na tloušťce vrstvy a na faktoru difuzního odporu.

Pěnový polystyren má v rozmezí objemové hmotnosti 15-30 kg/m³ faktor difuzního odporu μ od 20 do 100.

Pokud při prostupu vodní páry jakýmkoliv izolačním souvrstvím dojde k dosažení rosného bodu, začne vodní pára kondenzovat. Tímto způsobem může při nevhodně navržené skladbě dojít i ke kondenzaci vody uvnitř buněk EPS. Proto je třeba volit difuzní a tepelný odpor jednotlivých vrstev tak, aby rosného bodu uvnitř konstrukce nebylo dlouhodobě dosahováno [9].

2.3.6 Odolnost proti stárnutí

2.3.6.1 UV záření a povětrnostní vlivy

Používání pěnového polystyrenu po dobu více než 50 let ukazuje, že jeho vlastnosti zůstávají při správném použití nezměněny a že jeho životnost uvnitř stavebních konstrukcí je stejná nebo vyšší než životnost ostatních částí stavby. Při delším působení ultrafialového záření přirozeného slunečního světla na nechráněné polystyrenové desky povrchová vrstvička zežloutne a degraduje. Z praktických stavebních důvodů se ale nikdy EPS neužívá bez krycích vrstev, takže toto působení je z hlediska konečného použití bezvýznamné, nehledě na to, že uvedený jev nemá vliv na základní fyzikální vlastnosti materiálu. Je však třeba mít na zřeteli, že dlouhodobé nevhodné skladování na slunci v letním období může způsobit v důsledku narušení povrchu problémy s přilnavostí lepidel [9].

2.3.6.2 Odolnost vůči chemikáliím

Pěnový polystyren je odolný vůči běžným stavebním hmotám jako cement, vápno, sádra, anhydritovým směsím a stavebním dílcům, které jsou vyrobeny pomocí těchto pojiv. Bez odpovídajícího technického řešení jej není možno kombinovat s materiály uvolňujícími organická rozpouštědla [9].

2.3.6.3 Biologické chování

Pěnový polystyren nevytváří živnou půdu pro mikroorganismy. Nehnije, neplesniví, netrouchniví a neškodí mu ani půdní bakterie.

Pěnový polystyren neškodí životnímu prostředí a neohrožuje vodu. Při dodržování příslušných místních předpisů může být ukládán společně s domácím odpadem nebo být spalován ve spalovnách odpadů. Hygienická nezávadnost polystyrenu pro vnější i vnitřní izolaci jasně vyplývá ze skutečnosti, že se ze stejného materiálu běžně vyrábějí i obaly pro potraviny [9].

2.3.6.4 Odolnost proti ohni

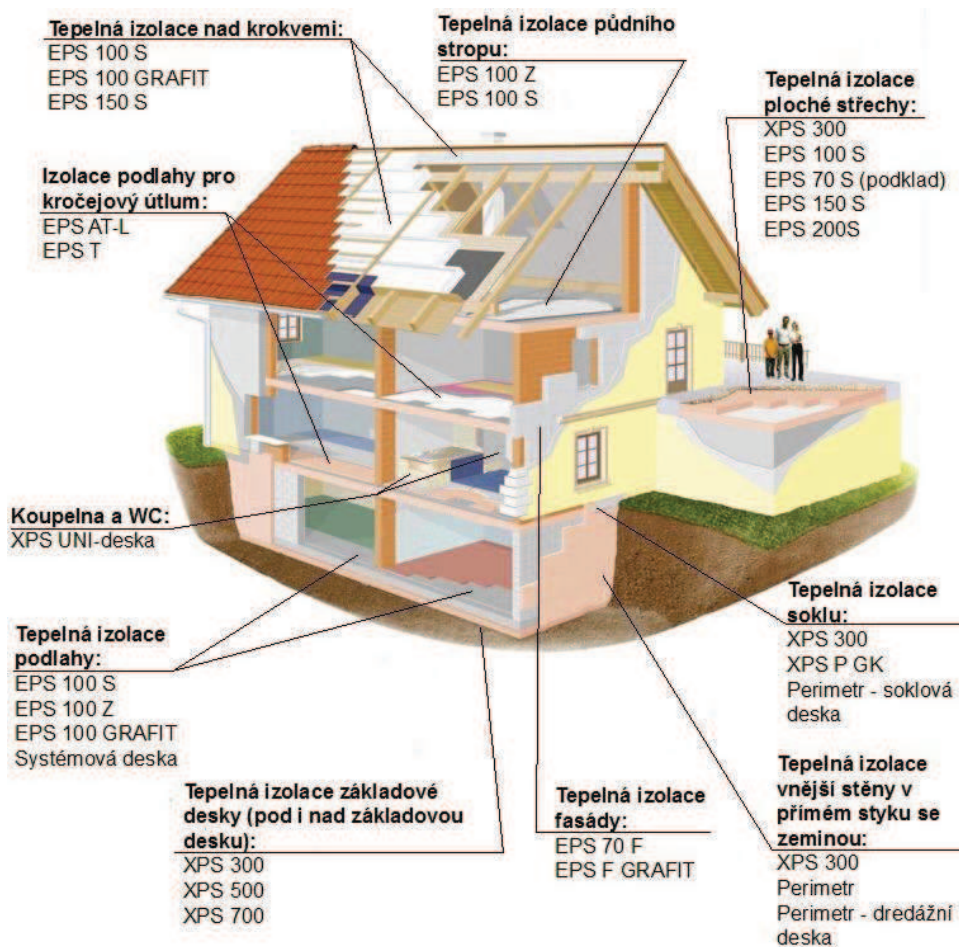
Prudký rozvoj výroby a aplikací EPS si během krátké doby vynutil vývoj tzv. samohášivého polystyrenu, který oproti původním lehce hořlavým typům odpovídá mnohem lépe přísným požadavkům na protipožární ochranu budov [9].

2.4 Značení polystyrénu a příklady jeho použití

Ve stavebnictví se používají čtyři základní varianty, které předurčují jeho použití:

- Z – základní (nízká přesnost desek, používaný na podlahy),
- S – stabilizovaný (používaný na střechy),
- F – fasádní (vysoká přesnost desek, zejména pro kontaktní zateplovací systémy)
- Perimetr – desky jsou minimálně nasákavé a mrazuvzdorné (použití tam, kde může dojít ke kontaktu s vodou, například u izolace soklu).

Typ polystyrénu se označuje např. EPS 70 S, kde číslo značí pevnost v tlaku v kPa. Dále jsou běžně k dodání polystyrény třídy 70, 100, 150 a 200 [4] [10].



Obr.2 Příklady použití polystyrenu ve stavbě podle [10].

3 Základní způsoby šíření tepla

Teplo se může šířit v libovolném prostředí pouze tehdy, pokud na různých místech tohoto prostředí jsou rozdílné teploty. Teplo potom postupuje z míst s vyšší teplotou do míst, kde je teplota nižší a dochází zde k vyrovnání teplot. Teplo se může šířit třemi základními způsoby[11][12][13][14]:

- vedením (kondukcí),
- prouděním (konvekcí),
- sáláním (radiací).

Šíření tepla se obvykle nekoná pouze jediným ze způsobů, ale reálná výměna tepla je především jejich kombinací.

3.1 Šíření tepla vedením

Přenos tepla vedením v pevných látkách je transportem tepelné energie ve směru klesající teploty. Děje se tak z toho důvodu, že teplejší, rychleji kmitající molekuly, předávají svou kinetickou energii sousedním, pomaleji kmitajícím molekulám. V procesu vyrovnávání teplot různě zahřátých částí tělesa vzniká tok tepla v důsledku tepelné vodivosti. Teplo se za určitých podmínek šíří také v kapalinách a plynech. Průběh vedení tepla určuje tzv. tepelnou vodivost[12][15].

Platí Fourierův zákon:

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx} = -\lambda \operatorname{grad} \theta \quad (1) ,$$

kde je:

q	hustota tepelného toku kolmá na směr proudění [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$],
λ	součinitel tepelné vodivosti [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],
θ	teplota [$^{\circ}\text{C}$],
x	směr proudění tepelného toku (souřadnice) [m].

Porovnat látky podle jejich tepelné vodivosti umožňuje veličina součinitel tepelné vodivosti λ . Podle tohoto součinitele se látky dělí na:

- Tepelné vodiče - látky s vysokou rychlostí vedení tepla a velkým součinitelem λ ,
- Tepelné izolanty - látky s nízkou rychlostí vedení tepla a malým součinitelem λ .

Vedení tepla lze z hlediska dynamiky procesu rozdělit na:

- Ustálené (stacionární) vedení tepla,
- Neustálené (nestacionární) vedení.

3.1.1 Ustálený teplotní stav

Pokud se teplota s časem nemění $d\theta/dt=0$, jedná se o teplotní pole ustálené – stacionární. Ustálený teplotní stav je zjednodušující předpoklad, který se používá v tepelně technických výpočtech. Tento předpoklad však nevystihuje skutečnou situaci. Vychází z předpokladu, kdy stavební konstrukce je oddělena dvěma prostředími s konstantními teplotami, které se v čase nemění a platí, že hustota tepelného toku je přímo úměrná rozdílu teplot vzduchu [13].

3.1.2 Neustálený teplotní stav

Jestliže je teplota funkcí času $\theta=f(t)$, pak $d\theta/dt \neq 0$ a teplotní pole je neustálené, což charakterizuje neustálený – nestacionární teplotní stav přenosu tepla, u kterého jsou teploty v jednotlivých bodech stavební konstrukce dané svou polohou a mění se v závislosti na čase. Pokud umístíme nějaké těleso s vyšší teplotou doprostřed prostoru, dochází k vzájemnému vyrovnání teplot. Postupně se zahřívají povrchové vrstvy ostatních částí konstrukce a pak i jejich vnitřní vrstvy. Po určitém čase se teploty vyrovnají teplotou prostředí a nastane teplotní rovnováha [12] [15].

Tab.1 Přehled hodnot materiálových vlastností vybraných materiálů [7] [15].

Materiál	λ [W/(m K)]	ρ [kg/m ³]	c [kJ/(kg.K)]	$\alpha \cdot 10^{-6}$ [1/K]
ocel	80 - 90	7800	0,4 - 0,5	12
hliník	229	2700	0,89	23,8
dřevo	0,7 - 1,6	500 - 1000	1,0 - 1,5	5 – 55
cihla	0,2 - 0,8	1400 - 2100	1,0 - 1,5	3 – 8
beton	0,5 - 0,8	1800 - 2200	0,7 - 1,1	5 – 10
sklo	0,75	2400 - 4700	0,7 - 0,9	3 – 9
led	2,2	917	2,09	-
voda	0,55 - 0,75	1000	4,2	0,13 - 0,18
suchý vzduch	0,025 - 0,03	1,0 - 1,45	1,0 - 1,05	-

3.2 Šíření tepla prouděním

Šíření tepla prouděním není možné u pevných látek, uplatňuje se pouze u tekutin (kapalin a plynů), případně u plazmatu. Pohybem hmoty dochází k vzájemnému pohybu jednotlivých částí, které mají odlišnou teplotu. Přenášením tepla v pohybujícím se prostředí je složitější než v nepohyblivém prostředí[12][15].

Volné proudění je pohyb kapaliny či plynu, který je způsoben pouze rozdíly v hustotě látky vyvolanými její rozdílnou teplotou. Nucené proudění je, pokud při výměně tepla je použit mechanický pohyb (např. pohyb vzduchu pomocí ventilátorů).

Rozlišují se dva případy proudění:

- laminární,
- turbulentní.

Laminární (neboli proudnicové) proudění je způsob viskózních kapalin, při kterém jsou dráhy jednotlivých částic kapaliny navzájem rovnoběžné. Částice se pohybují ve vzájemně rovnoběžných vrstvách, aniž by se navzájem mísily. Laminární proudění zůstává zachováno až do tzv. kritické rychlosti, kdy se mění na proudění turbulentní[15].

Turbulentní proudění je způsob, při kterém jednotlivé částice kapaliny přecházejí různými vrstvami kapaliny, čímž dochází k promíchávání těchto vrstev.

Platí Newtonův zákon:

$$q_k = h_k(\theta_s - \theta_a) \quad (2) ,$$

kde je:

q_k	hustota tepelného toku proudícího mezi vzduchem a povrchem konstrukce ($\text{W} \cdot \text{m}^2$),
h_k	součinitel přestupu tepla při proudění ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$),
θ_s	teplota povrchu tepla při proudění ($^{\circ}\text{C}$),
θ_a	teplota vzduchu ($^{\circ}\text{C}$).

3.3 Šíření tepla sáláním

Na rozdíl od šíření tepla vedením a prouděním představuje šíření tepla sáláním individuální druh šíření tepla. Při šíření tepla sáláním jde o přenos elektromagnetických vln s délkou 760 až 3000 nm, která se šíří v prostoru rychlostí světla. Tepelné sálání rozdílných těles je určované jejich teplotním stavem[15].

Ideální těleso, které má při dané teplotě maximální sálavou schopnost, se nazývá absolutně černé těleso. Sálavá energie všech skutečných těles představuje jen určitou část energie absolutně černého tělesa[12].

Převážná většina materiálů, včetně stavebních izolací, používaných ve stavebnictví disponuje povrchem s vysokou pohltivostí respektive emisivitou pro tepelné sálání. Skupina ušlechtilých kovů, měď, stříbro, zlato a dále hliník, prvek ze skupiny přechodných nezelezných kovů, vykazují vysoké hodnoty odrazivosti tepelného sálání respektive velmi nízké hodnoty emisivity. Tyto kovy jsou v různých vhodných aplikacích využívány jako reflexní izolace[15].

Celkové sálání tepla dopadající na těleso je:

$$Q_O = Q_A + Q_R + Q_T \quad (3) ,$$

kde je: Q_A část pohlcovaná tělesem,

Q_R část odražená tělesem,

Q_T část procházející tělesem.

3.4 Planckův vyzařovací zákon

Zahřátá tělesa vyzařují svoji energii po kvantech. Na základě kvantové teorie a v souladu se zákony pravděpodobnosti odvodil Planck svůj vyzařovací zákon, který konstatuje: „Záření o frekvenci f může být vyzařováno, nebo pohlcováno jen po kvantech energie o velikosti $e = h \cdot f$.“[16].

V tomto zákoně představuje h Planckovu konstantu, která má hodnotu $h=(6,6256\pm0,0005)\cdot10^{-34}$ J.s. Z uvedeného vyjádření Planckova vyzařovacího zákona je možné pro dokonale černé těleso ve vakuu odvodit vztah pro spektrální hustotu zářivého

toku dokonale černého tělesa E_{ol} jako funkci vlnové délky záření λ a teploty zářiče T [16][17].

$$E_{o\lambda} = \frac{dE_o}{d\lambda} = f(\lambda, T) = c^2 h \frac{2\pi\lambda^{-5}}{e^{\frac{ch}{k\lambda T}} - 1} \quad (4),$$

kde je:

- E_o hustota zářivého toku dokonale černého tělesa,
- k Boltzmannova konstanta $k = (1,38054 \pm 0,00018) \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$,
- c rychlost světla,
- T termodynamická teplota.

4 Přehled experimentálních metod pro stanovení tepelně izolační vlastnosti izolantů

Stanovení součinitele tepelné vodivosti je možno provádět v praxi několika základními způsoby, které se od sebe liší teplotním stavem zkušebního vzorku během průběhu měření a dále pak způsobem stanovení a vyhodnocení součinitele tepelné vodivosti zkušebního vzorku [7]. Metody můžeme rozdělit na:

1. Stacionární metody

- Metoda desky,
- Metoda chráněné teplé desky,
- Metoda měřidla tepelného toku,
- Metoda válce,
- Metoda koule.

2. Nestacionární metody

- Metoda nestacionárního tepelného toku,
- Metody tepelných impulsů (záblesková metoda a metoda topného drátu).

Dále uvádím popis nejdůležitějších metod.

4.1 Metoda desky

Podle ČSN 72 7012 „Stanovení součinitele tepelné vodivosti materiálů v ustáleném teplotním stavu – Metoda desky“ tato měřicí metoda patří k metodám základním a lze je označit za nejrozšířenější a nejpoužívanější metodu. Podstatou metody je navodit ve zkušebním vzorku ustálený teplotní stav na základě průměrných hodnot:

- elektrického příkonu topného elementu měrné desky,
- účinné plochy topné desky,
- teploty vztažené plochy teplého povrchu zkušebního vzorku,
- teploty vztažené plochy chladného povrchu zkušebního vzorku,
- tloušťky zkušebního vzorku.

Výpočtem lze stanovit hodnotu součinitele tepelné vodivosti zkušebního vzorku. Při měření musí být zajištěna v nejvyšší míře konstantní teplota chladné a teplé desky a nejnižší spád mezi měrnou deskou a její boční a spodní kompenzační částí. Tato metoda má dvě modifikace:

a) Metoda chráněné teplé desky (ČSN 73 7012-2). Hodnota součinitele tepelné vodivosti je určena na základě měření tepelného toku, který je úměrný příkonu, jenž je přiváděn dotopné části měrné zkušební desky.

b) Metoda měřidla tepelného toku (ČSN 72 7012-3). Zde je hodnota součinitele tepelné vodivosti vyjádřena z hustoty tepelného toku, který je úměrný rozdílu napětí a konstantě pro převod výstupního napětí na hustotu tepelného toku kalibrací známým materiálem, je tento měřicí postup považován za postup sekundární [7].

4.2 Metoda válce

Tato metoda se zabývá měřením hodnoty součinitele tepelné vodivosti zkušebních vzorků ve tvaru dutého válce. Ačkoliv se jedná o metodu stacionární, je základním předpokladem ustálení teplotního stavu.

Metoda válce je vhodná pro stanovení součinitele tepelné vodivosti u speciálních tvarovaných tepelně-izolačních výrobků ve tvaru dutého válce (izolace potrubí a trub). Vzhledem k tomu, že je nutný kontakt vnitřního měřicího válce se zkušebním vzorkem je

použitelnost této metody dána průměrem zkušebních válcových těles a vnitřním průměrem zkušebních vzorků [7].

4.3 Poensgenova metoda

Měřicí přístroj na principu Poensgenovy metody se skládá ze střední topné desky o rozměrech 500 x 500 mm a dvou chladících desek. Měřené vzorky stejné tloušťky a hmotnosti se vkládají mezi střední topnou desku a krajní chladící desky. Proti zamezení okrajových ztrát má topná deska po okrajích speciální kompenzační pásy podobné konstrukce, jako topná deska a je vystrojena stejným topným okruhem. Chladící desky mají takovou velikost, aby svojí plochou kryli nejen topnou desku, ale i kompenzační pás. Chladícími deskami proudí voda o teplotě 10°C, která je udržovaná na konstantní výšce [12].

Přístroj mezi kompenzačním pásem a chladící deskou se vyplní měřenou hmotou, případně jinou tepelně izolační hmotou. Celé toto zařízení se umístí v klimatizační skříni.

Měřené vzorky jsou čtvercového tvaru a mají totožný tvar jako topné desky. Úpravě povrchu je nutné věnovat mimořádnou pozornost, aby nevznikly mezi vzorky a deskami přístroje vzduchové vrstvy [12].

Po umístění vzorků do přístroje se zapne deska a kompenzační pás do elektrického proudu a zároveň se začnou chladit obě chladící desky. S měřením se může začít až po dosažení ustáleného teplotního stavu. Po dosažení ustáleného stavu se odčítá příkon elektrického proudu a teploty vnitřního a vnějšího povrchu každé z obou desek. Teploty se měří za pomoci termočlánků, nebo odporových teploměrů, které je vloženy na teplé a chladné straně měřených vzorků. Na každé straně se vzorky měří vždy alespoň pět termočlánků [12]. Z naměřených hodnot se vypočítá hodnota součinitele tepelné vodivosti pro každý jednotlivý měřicí interval podle vztahu:

$$\lambda = \frac{Nd}{2S(t_{ip} - t_{ep})} \quad (5) ,$$

kde je:	λ	součinitel tepelné vodivosti [W/(m.K)],
	N	příkon elektrického proudu měrné desky[W],
	d	tloušťka vzorku [m],
	S	plocha topné desky [m ²]

t_{ip} povrchová teplota vzorku na teplé straně [$^{\circ}\text{C}$],

t_{ep} povrchová teplota vzorku na chladné straně [$^{\circ}\text{C}$].

Výsledná hodnota součinitele tepelné vodivosti se stanoví jako průměrná hodnota z dílčích údajů [12].

4.4 Metoda nestacionárního tepelného toku

Metoda nestacionárního tepelného toku (ČSN 72 1105) slouží ke stanovení hodnoty součinitele tepelné vodivosti tuhých a sypkých materiálů. Měření probíhá při teplotách, vlhkostech a objemových hmotnostech, které odpovídají reálným podmínkám v konstrukci[7].

Součinitel tepelné vodivosti se stanovuje výpočtem z naměřených hodnot objemové hmotnosti vzorku, časové změny teploty a měrné tepelné kapacity vzorku. Měrná tepelná kapacita vzorku se stanoví samostatným měřením pomocí kalorimetrické metody.

Jak je patrné z předcházejícího textu, ke zjištění hodnoty součinitele tepelné vodivosti se provádí dvě různé zkoušky. Prvním krokem je měření průběhu teploty v závislosti na čase[7].

Při měření teplotního průběhu se provádí následující postup. Nejprve je třeba upravit vlastní vzorek tak, aby jeho měřené plochy byly dostatečně hladké a rovnoběžné. Poté se vzorek umístí do měřicího zařízení. Styk s tepelně-izolační výplní se utěsní vhodným tmelem a na povrch vzorku se rozprostře tenká polyethylenová fólie. Je nutné, aby mezi vzorkem a polyethylenovou fólií nevznikly vzduchové dutiny. Na fólii se naliže chladicí směs o teplotě 0°C . Poté přístroj uzavřeme poklopem. Měření spočívá ve sledování teplotního průběhu na spodní ploše vzorku v závislosti na čase. Měření se ukončí v okamžiku, ve kterém je teplota na spodní ploše vzorku menší než 50 % hodnoty rozdílu teplot mezi horní a spodní plochou vzorku při začátku měření[7].

Druhou částí měření je stanovení měrné tepelné kapacity vzorku c J/(kg.K). Pro toto měření se užívá zkušebního zařízení popsané v ČSN 72 1105. Měření měrné tepelné kapacity se provádí tak, že se vysušený vzorek vloží do polyethylenového obalu. Vzorek se zváží a vytemperuje na teplotu $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Poté se kalorimetr naplní vodou o teplotě $40^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Pak se registrační aparaturou sleduje teplota v kalorimetru a po ustálení se do kalorimetru vloží zkušební vzorek. Měření spočívá ve sledování teploty vody v kalorimetru. Měření probíhá do té doby, dokud nedojde k ustálení teploty vody v kalorimetru[7].

4.5 Metoda topného drátu

Metoda topného drátu je vhodná jak pro měření materiálů hutných, tak i materiály zrnité, nebo práškové. Měření se provádí tak, že se nejprve připraví dva až tři vzorky, jejichž rozměry jsou alespoň 200 mm x 100 mm x 50 mm. Tyto vzorky tvoří zkušební celek. Povrchové plochy dvou vzorků, které se ve zkušebním celku navzájem dotýkají, musí být zabroušené tak, aby odchylka od rovinnosti dvou bodů nebyla větší než 0,2 mm. Do hutných materiálů je třeba vytvořit zářezy pro umístění měřícího obvodu. Měřící obvod se v zářezech zatmelí tmelem z jemně mletého zkušební vzorku smíšeného s malým množstvím vhodného pojiva[7].

Zkušební celek se umístí do pece a zároveň se zvýší se teplota v peci na teplotu měření. Jakmile dosáhne teplota v peci požadovanou teplotu, připojí se obvod topného drátu ke zdroji, který je nastaven tak, aby nárůst teploty topného drátu dosahoval maximálně 100°C za 15 minut. Od tohoto okamžiku dochází k záznamu teploty topného drátu. Měření se ukončí po 10 – 15 minutách. Dále se musí počkat dokud se teplota neustálí a měření se ještě dvakrát opakuje. Tímto postupem se naměří tři hodnoty rychlosti nárůstu teploty topného drátu za stejných podmínek[12][7].

IV. Praktická část

Pěnový polystyrén je nejpoužívanější tepelná izolace u nás. Po zabudování do stavební konstrukce na něj působí řada klimatických vlivů. Jedná se o projev, který byl zmiňován výrobcí pěnového polystyrénu, neboť se ukazuje, že pěnový polystyrén s přídavkem koloidního grafitu se ve stavbě chová nestandardně. Totiž vlivem teplotních změn se objevují nežádoucí spáry mezi jednotlivými deskami pěnového polystyrénu a také jsou známy případy, kdy dochází k celkovému odloupení celé tepelné izolační desky.

Mým úkolem je tento projev studovat a popsat. Spáry se objevují zejména v údobí, kdy vnější povrch stěn není osluněn. Pro zjištění teplotních pochodů v obvodové stěně při slunečním zatížení, na níž je upevněna izolační deska z pěnového polystyrénu, jsem sestavil strojový simulační program, který jsem nazval SCHMIDT. Pomocí tohoto programu jsem modeloval různé situace zatížení vnější teplotou a osluněním, které mohou nastat během roku.

1 Popis programu SCHMIDT

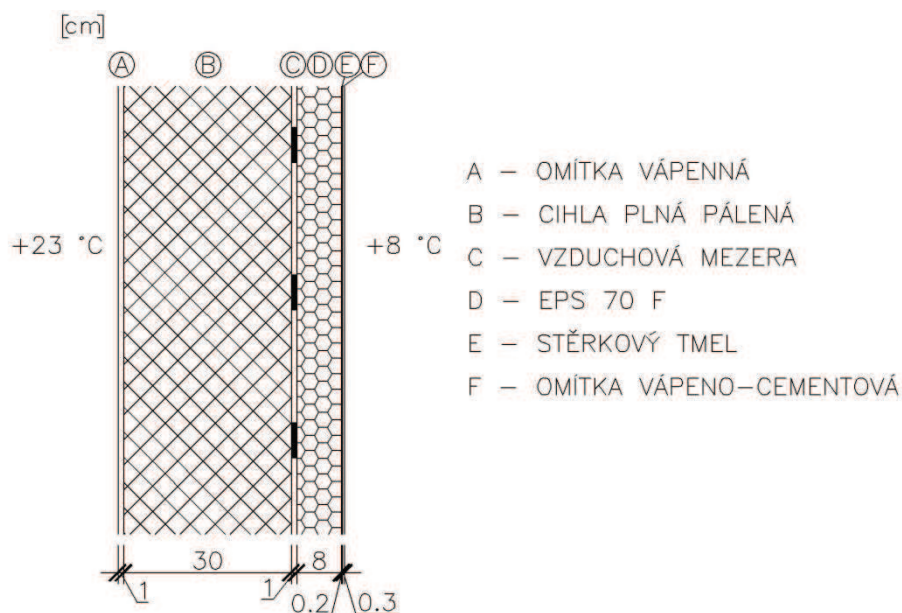
Program SCHMIDT, jehož název je odvozen od Schmidty metody, jsem pod vedením vedoucího diplomové práce sestavil v jazyce Pascal v prostředí programu Delphi. Program se skládá celkem ze dvou částí, a to program na výpočet nestacionárního průběhu tepla a program pro vykreslení teplotního průběhu v libovolné rovině stěny.

První část programu vypočítá jednotlivé teploty pro zvolený časový úsek a pro každé rozhraní mezi vrstvami. Pro požadovaný výpočet musíme nejdříve zadat vstupní hodnoty dotextového souboru. Nejprve musíme zadat počet vrstev konstrukce, se kterými bude program počítat, poté následují podrobné hodnoty o materiálových fyzikálních vlastnostech jednotlivých vrstev, a to v pořadí:

- počet vrstviček, které si má program pro výpočet rozdělit,
- tloušťka jednotlivé vrstvy [m],
- součinitel tepelné vodivosti [W/(m.K)],
- objemová hmotnost [kg/m^3] a
- měrná tepelná kapacita [J(kg.K)].

Další údaj, který musíme zadat, je vnitřní a venkovní teplota, dále pak počet hodin požadovaného výpočtu a interval výpisu teplot. V poslední řadě musíme zadat pořadový den v roce a hodinu během dne, od kterého bude výpočet probíhat. Příkladem vstupních

dat uvádím jednoduchou skladbu konstrukce se zateplením a následně její formulaci do vstupního textového souboru.



Obr.3 Schéma jednoduché skladby zdiva se zateplením.

Pro konstrukci, která jena obrázku 3, byvstupní údaje vypadaly takto:

6					(počet vrstev)
2	0.01	0.8	1600	840	(jednotlivá vrstva – A)
6	0.3	0.2	800	830	(jednotlivá vrstva – B)
1	0.01	0.025	1	1	(jednotlivá vrstva – C)
7	0.08	0.04	25	1250	(jednotlivá vrstva – D)
2	0.002	0.99	1600	840	(jednotlivá vrstva – E)
2	0.003	0.99	1200	1010	(jednotlivá vrstva – F)
8	23				(venkovní a vnitřní teplota)
24	1.0				(počet hodin a jejich rozdělení)
172	0				(pořadový den v roce, start v 00:00)

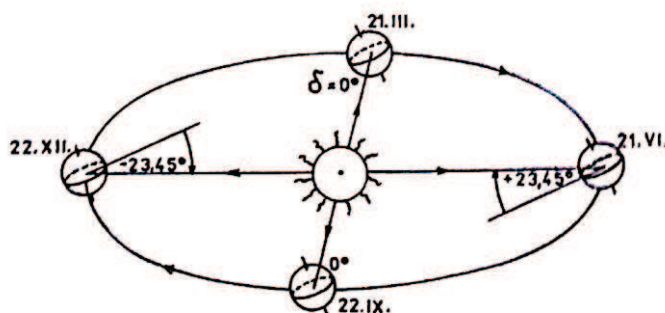
Po načtení vstupních hodnot začne program počítat, pro každý časový úsek program využívá funkci IGLOB (Intenzita Globálního Oslunění Budov). Tato funkce počítá s výškou Slunce vzhledem k zeměpisné poloze a místu konstrukce. Podle těchto hodnot, které jsou podrobněji popsány níže v samostatné kapitole, vypočítá intenzitu oslunění ze Slunce dopadající na povrch konstrukce. Pro simulaci jsem použil nejneprůzračnější pod-

mínku, a to orientaci stěny na jih. Vypočítané hodnoty převezme druhá část programu, která vykreslí do grafu průběh teplot v posuzované stěnové konstrukci.

2 Funkce IGLOB

2.1 Deklinace Slunce

Při pohybu Země okolo Slunce je rovina rovníku odkloněná od roviny oběžné dráhy o $23,45^\circ$, to zapříčiňuje v průběhu roku neustálou změnu polohy Slunce vzhledem na místo posuzování na zemském povrchu. Tuto roční změnu vyjadřujeme pomocí deklinace Slunce δ . Deklinace Slunce se během roka mění od $-23,45^\circ$ v den zimního slunovratu do $+23,45^\circ$ v den letního slunovratu. Nulovou hodnotu dosahuje v jarní a podzimní rovnodennosti, kdy slunečné paprsky dopadají na zemský povrch rovnoběžně s rovinou rovníku – viz obrázek 4 [12] [19].



Obr.4 Schematické znázornění roční změny deklinace Slunce [12].

Přesné hodnoty δ se odvozují z astronomických pozorování. Na výpočet oslunění budov je možné s dostatečnou přesností určit deklinaci Slunce ze vztahu:

$$\delta = 23,45^\circ \sin(t - 109^\circ) \quad (6) ,$$

kde je:

$$t = 0,98^\circ D + 29,7^\circ M \quad (7) ,$$

D číslo dne v době posuzování,

M číslo měsíce v době posuzování.

Vliv denní oblohy na změnu vzájemné polohy Slunce a místa posuzování na zemském povrchu, se vyjadřuje pomocí hodinového úhlu Slunce τ [12].

Ve výpočtových vztazích sférické astronomie časový údaj o okamžité poloze Slunce se vyjadřuje v úhlové míře a vztahuje se na pravý slunečný čas PSČ. Pravý slunečný čas je odvozený rozdělením pravého slunečního dne na 24 hodin. Pravý slunečný čas je vlastně časový interval mezi dvěma vrchními kulminacemi Slunce nad místem posuzování. Pravý sluneční čas v úhlové míře se určuje z podmínky $24h = 360^\circ$, kde začátek úhlové stupnice je v okamžiku kulminace Slunce. Takto vyjádřený časový údaj v úhlové míře se nazývá hodinový úhel Slunce τ a vypočítá se ze vztahu:

$$\tau = 15^\circ(PSČ - 12^\circ) \quad [^\circ] \quad (8) .$$

Je nutné si uvědomit, že časový údaj podle našich hodinek není shodný s pravým slunečním časem. Vyplývá to z toho, že v průběhu roku délka pravého slunečního dne není stejná. Tyto nerovnosti jsou vyvolané změnou vzdálenosti Země od Slunce a rychlosti pohybu Země po elipse. Přesto nemůže být pravý sluneční den základem jednotného času. Tyto nevýhody se dají vyloučit zavedením tzv. středního slunečního času SSČ. Vychází se přitom z idealizovaného předpokladu, že Země obíhá okolo Slunce po kruhové dráze s konstantní obvodovou rychlostí rovnající se průměrné rychlosti Země na skutečné oběžné dráze. Hodnoty časové rovnice se odvozují z astronomických pozorování a uvažují se pro jednotlivé roky v hvězdářských ročenkách. Změnu časové rovnice po jednotlivých dnech v průběhu roku lze pro výpočet oslunění budov vyjádřit vztahem [19]:

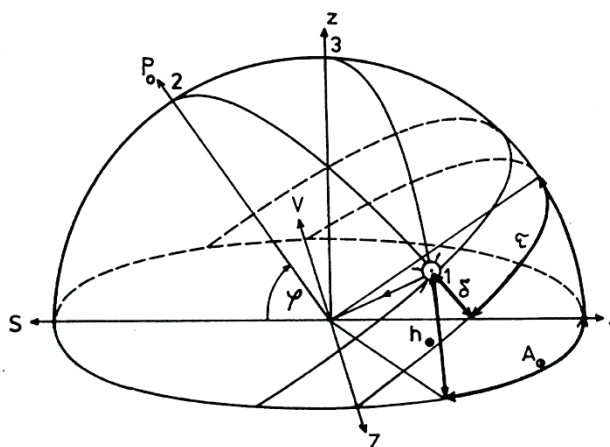
$$\eta = 0,125 \sin(t - 32^\circ) + 0,165 \sin(2t - 38^\circ) \quad [W] \quad (9) .$$

2.2 Výška Slunce

Polohu Slunce vzhledem na horizontální rovinu v místě posuzování definujeme výškou Slunce h_O . Je to úhel, který svírá slunečný paprsek s horizontální rovinou.

Geografickou polohu místa posuzování definujeme jeho zeměpisnou šířkou φ , neboli úhlem, který svírá zenitová přímka s rovinou rovníku [12] [19].

$$\sinh_o = \sin\varphi \sin\delta + \cos\varphi \cos\delta \cos\tau \quad (10)$$

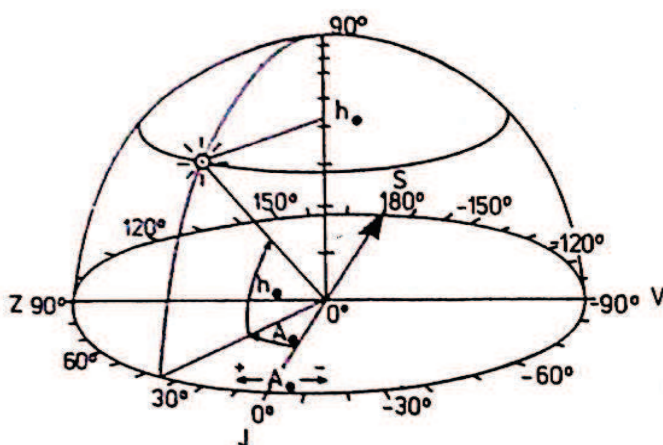


Obr.5 Výpočtové schéma na odvození souřadnic Slunce [12].

2.3 Azimut Slunce

Druhou souřadnicí Slunce je azimut Slunce A_O . Je to úhel, který svírá průmět slunečního paprsku na horizontální rovinu v místě posuzování s jižním směrem. Azimut Slunce směrem k východu má záporné znaménko a směrem k západu má znaménko kladné. Pro výpočet azimutu slunce jsem používal tento vztah [12]:

$$\cos A_o = \frac{tg\varphi}{\cos h_o} \left(\sin h_o - \frac{\sin \delta}{\sin \varphi} \right) \quad (11)$$

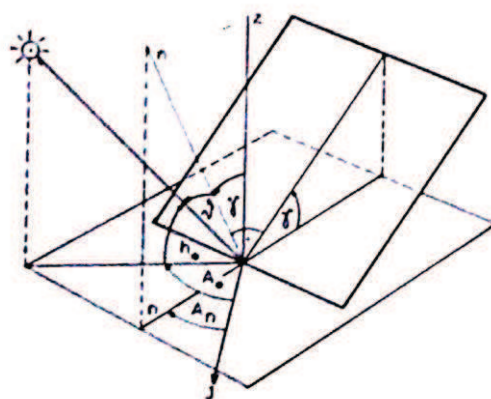


Obr.6 *Určení polohy Slunce* [12].

2.4 Úhel dopadu

Úhel dopadu ϑ je úhel, který svírá slunečný paprsek s normálou na rovinu posuzování. Polohu roviny posuzování udává sklon a orientaci roviny k světovým stranám. Sklon roviny γ udává úhel, který na vnitřní straně svírá jeho spádová přímka s vodorovnou rovinou [12] [19].

$$\cos \vartheta = \cos \gamma \sin h_0 + \sin \gamma \cos h_0 \cos(A_0 - A_n) \quad (12)$$



Obr.7 Výpočtové schéma pro úhel dopadu slunečního paprsku na skloněnou rovinu [12].

2.5 Přímé sluneční záření

Intenzita přímého záření dopadajícího na plochu kolmou ke směru paprsků I_{pn} :

$$I_{pn} = I_0 \cdot \exp\left(-\frac{Z}{\varepsilon}\right) \quad [\text{W/m}^2] \quad (13) \quad ,$$

kde je: ε součinitel, který závisí na výšce Slunce nad obzorem a na nadmořské výšce daného místa [-],

Z součinitel znečištění atmosféry (hodnoty jsou z meteorologické stanice Brno Tuřany).

Intenzita přímého slunečního záření I_p dopadající na obecně položenou plochu:

$$I_P = I_{Pn} \cdot \cos \gamma \quad [\text{W/m}^2] \quad (14)$$

Intenzita slunečního záření:

$$I_d = 0,5(1 + \cos \alpha)I_{Dh} + 0,5r(1 - \cos \alpha)(I_{Ph} + I_{Dh})[\text{W/m}^2] \quad (15) \quad ,$$

kde je: r reflexní schopnost okolních ploch pro sluneční paprsky [%],
 I_{Ph} intenzita přímého slunečního záření na vodorovnou plochu [W/m^2],
 I_{Dh} intenzita difuzního slunečního záření na vodorovnou plochu [W/m^2].

Pro intensity I_{Ph} a I_{Dh} platí rovnice:

$$I_{Ph} = I_{Pn} \cdot \sin h \quad [\text{W/m}^2] \quad (16) \quad ,$$

$$I_{Dh} = \frac{1}{3}(I_O - I_{Pn}) \cdot \sin h \quad [\text{W/m}^2] \quad (17) \quad ,$$

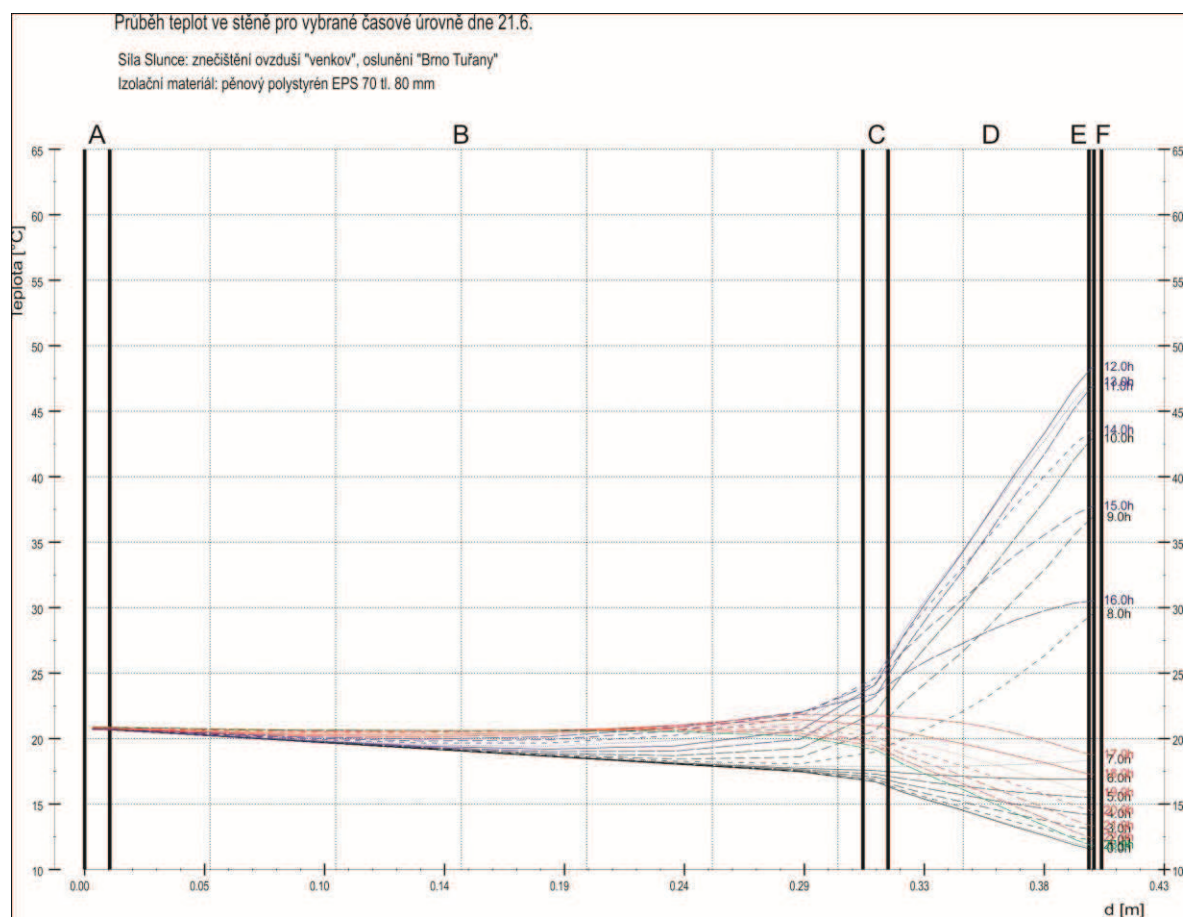
kde je: I_{Pn} intenzita přímého slunečního záření na plochu kolmou ke slunečním paprskům [W/m^2],
 I_O sluneční konstanta $I_O = 1358 \text{ W/m}^2$.

Výsledný energetický účinek slunečního záření se vypočte podle vztahu:

$$I = I_P + I_D \quad [\text{W/m}^2] \quad (18) \quad .$$

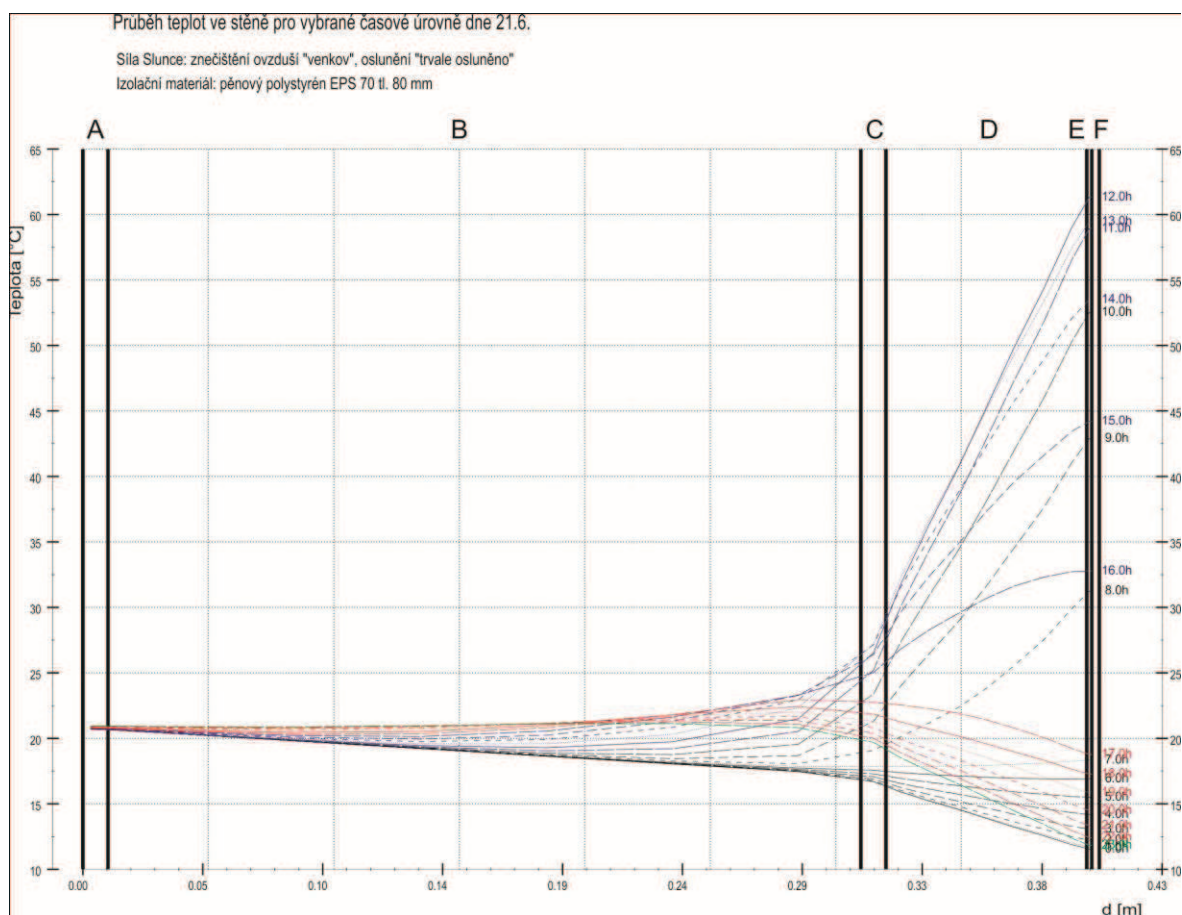
Pro ilustraci uvádím grafický průběh teploty v obvodové stěně pro tloušťku tepelné izolace 80 mm a pro případ lepení tepelně izolačních desek „na bochánky“, neboť takto vzniká mezi stěnou a tepelně izolační deskou vzduchová dutina. Ve výpočtu jsem zohlednil tloušťku vzduchové vrstvy 10 mm. Je zřejmé, že se jedná o nepříznivý případ zabudování izolačních desek, neboť se takto zabrání bezprostřednímu odvodu tepelného toku z oslunění do konstrukce zdiva. I v tomto případě byla zjištěna nejvyšší amplituda na vnějším líci izolační desky o 6 K.

Podle tohoto výpočtového důkazu lze tvrdit, že argumentace o zvýšení teploty izolačních desek o tloušťce 80 mm v kontaktní rovině s lepicí stěrkou nad 40°C je při použití desek pěnového polystyrénu nereálná.



Graf 4 Grafický výstup teplotních průběhů z programu SCHMIDT.

V grafu 4 lze zjistit, že teplota na vnějším povrchu zateplovací vrstvy v pravé poledne dne 21.6. vzrostla na $+48^{\circ}\text{C}$. Pro posuzovaný výpočet jsem započítal údaj o míře oblačnosti z dlouhodobého meteorologického sledování stanice v Brně Tuřanech. Jedná se o statistické údaje, které jsou zprůměrovány z několikaletého měření pro tento den.



Graf 5 Průběh teplot u trvale osluněné konstrukce.

U tohoto grafu je možno si všimnout, že vnější povrchová teplota oproti předchozímu grafu vzrostla o více než 10°C. V tomto případě jsem v programu započítal podmínku trvalého oslunění konstrukce. V rámci posouzení teplotního průběhu z hlediska účinku extrémního teplotního zatížení však využiji teplotních údajů z grafu 5, který poskytuje údaje za maximálního oslunění pro nejteplejší den v roce. Těchto teplot využívám pro vymezení podmínek následného laboratorního experimentu.

3 Měření teplotní délkové roztažnosti vzorků pěnového polystyrénu

Z toho důvodu jsem sestavil vyhřívanou komoru, ve které jsem zahříval vzorky polystyrénu a snažil se tak nasimulovat teplotní podmínky, kterým je polystyrén vystaven účinkem oslunění během dne. V této komoře jsem zkoušel porovnávat tepelnou roztažnost při stanovených teplotách bílého a šedého polystyrénu. Jednalo se o 7 různých vzorků, jejichž rozměry jsem zvolil 100mm x 100mm x 250 mm pro stanovení teplotní délkové roz-

tažnosti a 300 mm x 300 mm x 50 mm na měření součinitele teplotní délkové vodivosti. Každý vzorek jsem obdržel v 6. kusech.

Tab.2 Přehled vzorků

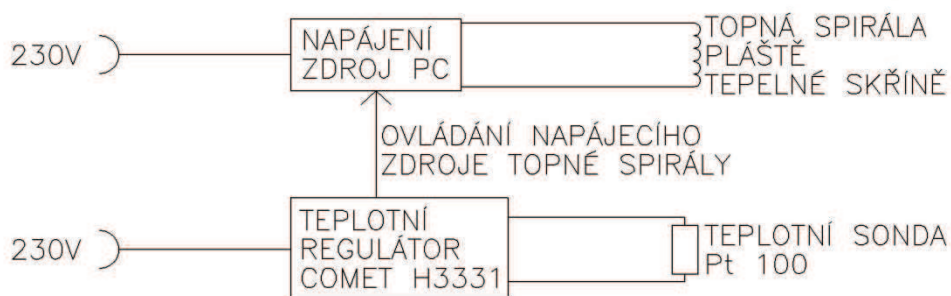
(tabulkový přehled vlastností pěnového polystyrénu dodaný výrobcem).

číslo vzorku	označení vzorku	m [kg]*	Datum výroby
1	šedý 100	137	4.12.
2	150 S	176	4.12.
3	150 S	173	4.12.
4	šedý 70 F	116	4.12.
5	šedý 150	174	27.11.
6	FH	108	30.11.
7	100	140	30.11.

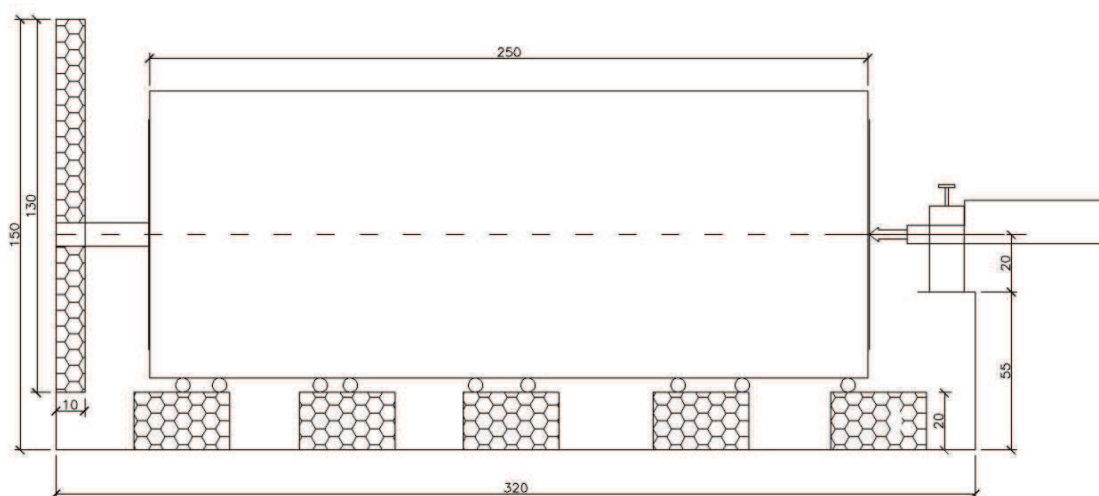
*hmotnost celého bloku (7 m³)

3.1 Vyhřívání komora, návrh a popis konstrukce

Pro tento experiment jsem z ocelového plechu o tloušťce 2 mm vyrobil speciální komoru, která se skládá ze dvou držáků pro vzorky polystyrénu. Přední část slouží pro uchycení úchylkoměrů a samotných vzorků, druhá součást slouží pro uzavření prostoru a zároveň je zdrojem tepla zajištěného pomocí odporového drátu. Celá komora je z vnější strany oblepena podlahovým polystyrénem s hliníkovou fólií o tloušťce 3 cm. Z vnitřní části se jedná o obyčejný expandovaný polystyrén o tloušťce 2 cm. Tento polystyrén je pod vzorkem umístěn pouze částečně. Je to z toho důvodu, aby nebyl komplikován výpočet výpočtové hodnoty a byla zajištěna stejná teplota ve všech místech uvnitř této komory. V čele přední části je otvor pro dva úchylkoměry Sylvac, s přesností rozlišení 0,001 mm, tepelné čidlo a kontrolní teploměr. Vzorky jsou umístěny mezi pevné desky tvořící hranici, které jsou spojeny s úchylkoměry na straně jedné a skleněnou tyčinkou na straně druhé. Skleněná tyčinka byla zvolena z důvodu nízké teplotní roztažnosti. Vůči tepelné kontrakci vzorků zároveň zajišťují plastové kuličky o průměru 5 mm.



Obr.8 Schéma zapojení měřicí soustavy



Obr.9 Schéma první části se vzorkem v mm.

3.1.1 Výpočet tepelné bilance vyhřívané komory

Výpočet ploch jednotlivých částí komory tvořící její obal:

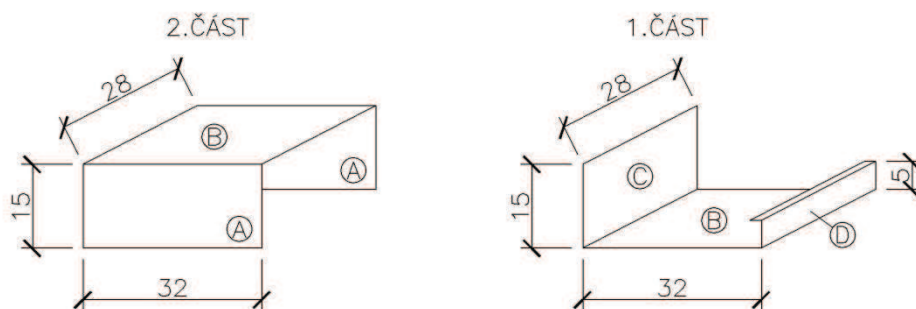
$$S_A = 2 \cdot 0,32 \cdot 0,15 = 0,096 \text{ [m}^2\text{]} \quad (19) \quad ,$$

$$S_B = 2 \cdot 0,32 \cdot 0,28 = 0,1792 \text{ [m}^2\text{]} \quad (20) \quad ,$$

$$S_C = 1 \cdot 0,15 \cdot 0,28 = 0,042 \text{ [m}^2\text{]} \quad (21) \quad ,$$

$$S_D = 1 \cdot 0,05 \cdot 0,28 = 0,014 \text{ [m}^2\text{]} \quad (22) \quad ,$$

$$S = S_A + S_B + S_C + S_D = 0,3312 \text{ [m}^2\text{]} \quad (23) \quad .$$



Obr.10 Schematický návrh první a druhé části vyhřívané komory.

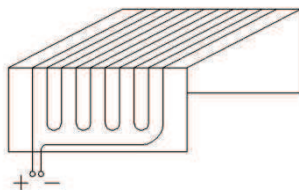
Výpočet hustoty ztrátového tepelného toku za největšího teplotního spádu 55 K^{-1} .

$$q = \frac{\Delta t}{R} \cdot S = \frac{55}{1,304} \cdot 0,3312 = 13,96 \text{ [W]} \quad (24)$$

Výpočet odporu topného vinutí pro napětí zdroje 12V:

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{12^2}{13,96} = 10,31 \text{ } [\Omega] \quad (25)$$

Po konzultaci s vedoucím diplomové práce jsem zvolil jako topné tělesoměděný drát o průměru 0,2mm, který byl stejnoměrně plošně rozprostřen na víko skříně, jež představuje tepelný zdroj pro kompenzaci ztrátového tepelného toku. Aby byla lépe zajištěna přílnavost odporového drátu k víku a zároveň zabráněno nechtěnému přepálení drátu, byl drát umístěn mezi dvě vrstvy lepicí pásky. Zdrojem napětí pro vytápění tepelné skříně slouží počítačový stabilizovaný zdroj napájecího napětí 12 V.



Obr.11 Schématické znázornění rozmístění odporového drátu na víku komory.

3.1.1.1 Použité vzorce obecně

Pro stanovení potřebného tepelného výkonu vyhřívané komory byly odvozeny následující vztahy, pomocí nichž byly vypočteny ztrátové tepelné toky. Tento výpočet sloužil

pro zjištění výkonové zátěže pro temperování vyhřívané komory až do teploty $+70^{\circ}\text{C}$, která byla stanovena jako mezní s ohledem na stabilitu pěnového polystyrénu.

$$q = \frac{(\theta_i - \theta_e)}{R} \cdot S \quad [\text{W}] \quad (26) \quad ,$$

kde je:

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad [(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}] \quad (27) \quad ,$$

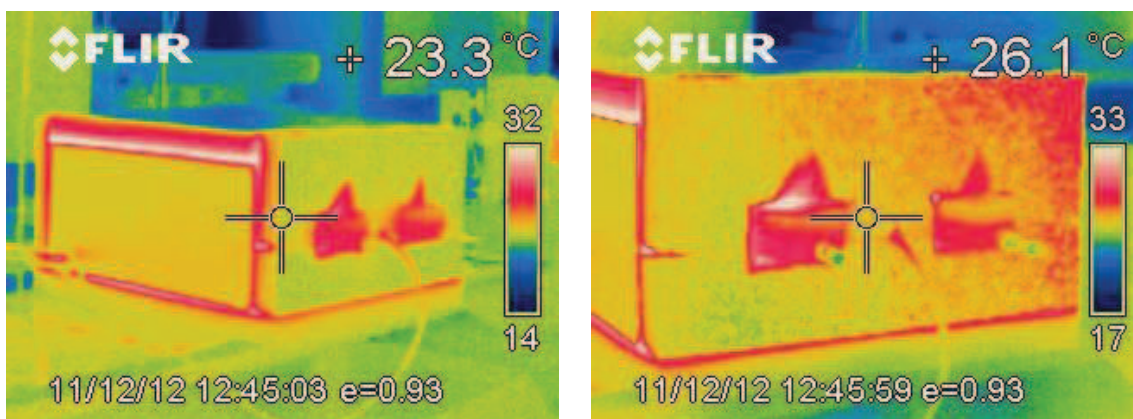
- q hustota tepelného toku $[\text{W}/\text{m}^2]$,
- θ_i teplota vnitřního vzduchu $[^{\circ}\text{C}]$,
- θ_e teplota vnějšího vzduchu $[^{\circ}\text{C}]$,
- S plocha $[\text{m}^2]$,
- R tepelný odpor konstrukce $[(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}]$,
- d tloušťka konstrukce $[\text{m}]$,
- λ součinitel tepelní vodivosti $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$.

$$P = U \cdot I = \frac{U^2}{R} \Rightarrow \frac{U^2}{P} = R \quad [\text{W}] \quad (28) \quad ,$$

- kde je:
- P práce $[\text{W}]$,
 - U napětí $[\text{V}]$,
 - I proud $[\text{A}]$,
 - R odpor $[\Omega]$.

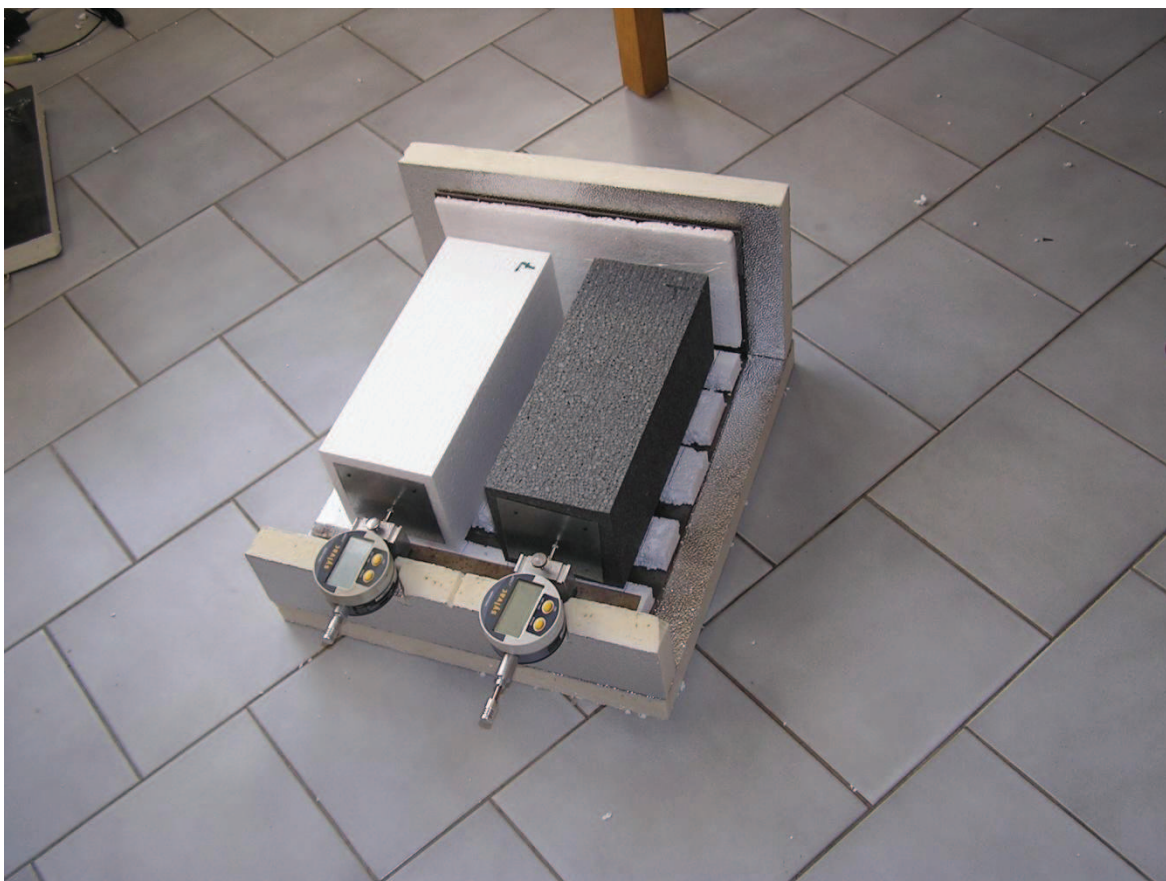
3.2 Průběh měření

Pěnový polystyrén, jak známo, nemá příliš odolný povrch proti pronikání špičatých kontaktních hrotů délkových indikátorů. Před měřením musíme ke každému vzorku připevnit dvě pevné desky, aby bylo zabráněno pronikání hrotu indikátoru do vzorku a tím zkreslení naměřených hodnot. Poté umístíme vzorek do vyhřívané komory mezi délkový indikátor a skleněnou tyčinku a zakryjeme vyhřívaným víkem. Následně mezi vzorky umístíme teplotní čidlo, umístíme druhou polovinu čela nad délkovými indikátory a pro zabránění úniku tepla, vizobrázek 12, stáhneme gumovým stahovačem.



Obr.12 Termografické vyobrazení teplotních polí na povrchu vyhřívané komory.

Na obrázku 12 jsou patrné teplotní uniky vlivem konstrukčních netěsnosti ve vyhřívané komoře. Zvýšení povrchové teploty se projevuje v oblasti upevnění délkových indikátorů Sylvac, na obrázku vpravo, a ve spáře mezi víkem vyhřívané komory a její základnou.



Obr.13 Vyobrazení umístění vzorků polystyrénu ve vyhřívací komoře.

Nyní musíme na teplotním regulátoru nastavit požadovanou teplotu, na kterou se bude vnitřní prostředí uvnitř komory zahřívat. Ihned po nastavení této hodnoty se začne odporový drát zahřívat, čímž docílíme vytopení komory a následně zahřátí vzorků. Teplotní

regulátor zajišťuje, aby nastavená teplota nebyla překročena. Jakmile se teplota nastavená na teplotním regulátoru rovná teplotě uvnitř komory, zdroj odporového vytápění se vypne.

Zápis se provede na začátku měření a potom pravidelně po stejných časových úsecích. Jakmile se vnitřní teplota ve skříni ustálí, což odpovídá temperování cca 2 – 3 hodinám, můžeme po odečtení údajů na indikátorech nastavit další požadovanou teplotu a pokračovat v měření.



Obr.14 *Fotografie teplotního regulátoru COMET H3331*

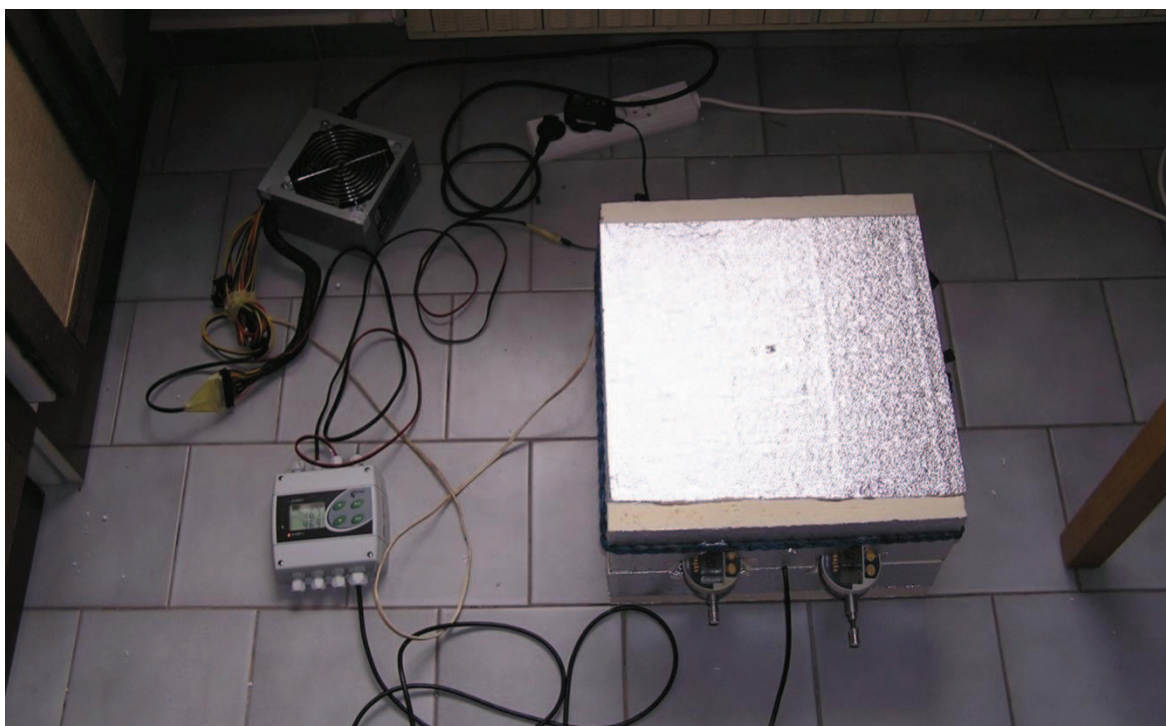
Vlivem setrvačnosti vnitřní teploty ve skříni je nutné nastavovat vždy teplotu nižší podle tabulky 3.

Tab.3 *Přehled odchylek po kalibraci teploty regulátoru*

Požadovaná teplota [°C]	Nastavená teplota [°C]
25	22,2*
30	27,8
35	33
40	38,6
45	43,5
50	48,9
55	54,2
60	59,4
65	64,7

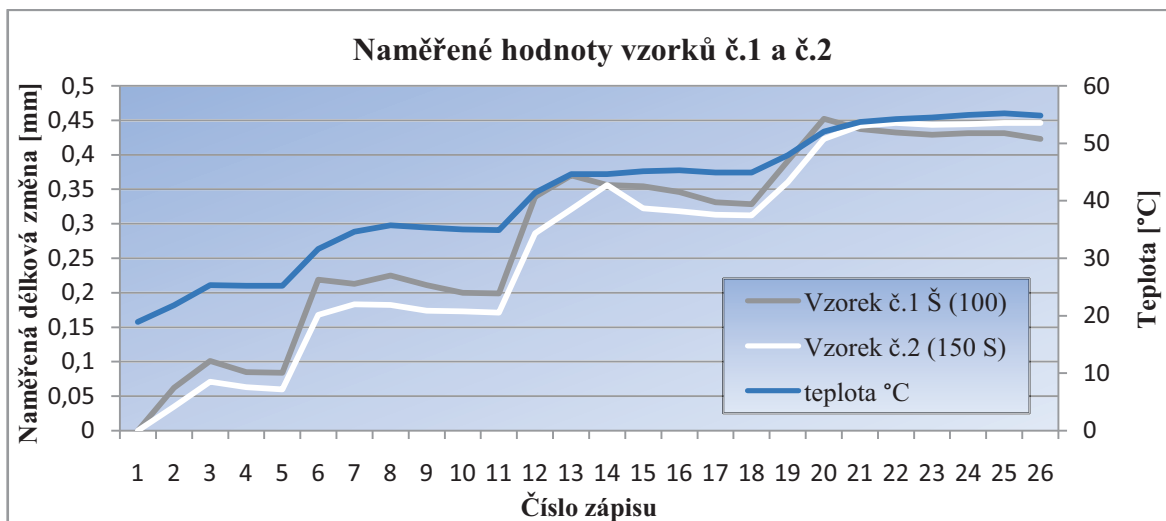
**platí pouze pokud měření začíná na teplotě 20°C nebo méně.*

Z důvodu citlivosti úchylkoměrů je nutné provádět měření v místě s minimem otřesů. Pokud by se tak nestalo, hrozilo by zkreslení výsledků.

Obr.15 *Uspořádání měřicích součástí při probíhající měření délkové roztažnosti.*

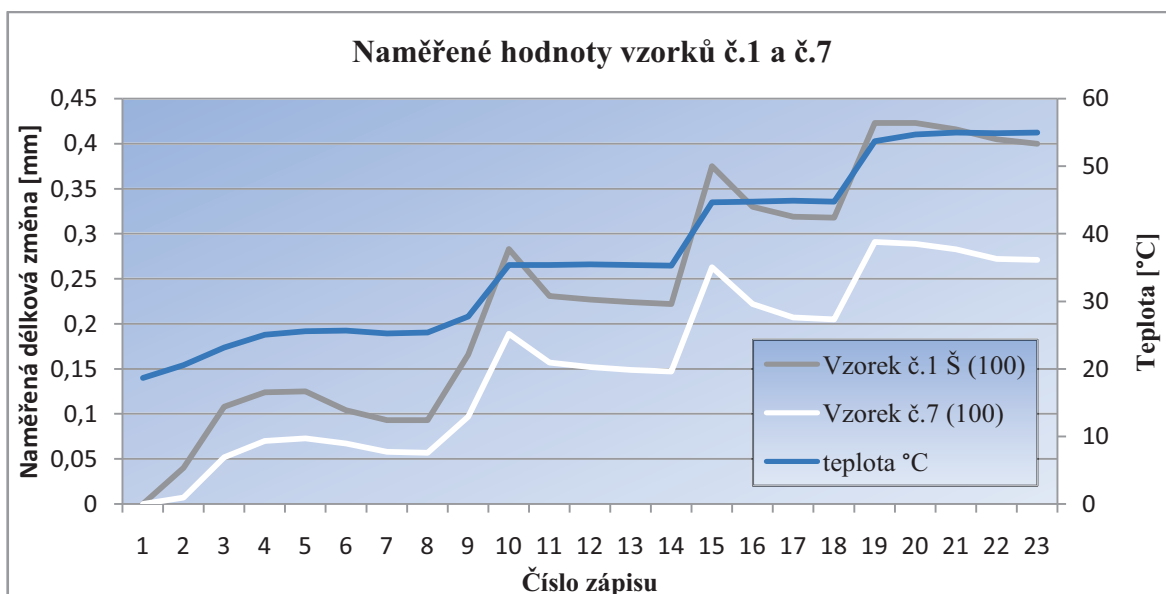
4 Výstup naměřených dat z vyhřívané komory

Níže uvádím některé grafy s naměřenými délkovými hodnotami, pro lepší přehled je průběh veličiny bílého polystyrénu označen v grafech vždy bílou barvou a šedý pěnový polystyrén označen šedou barvou.



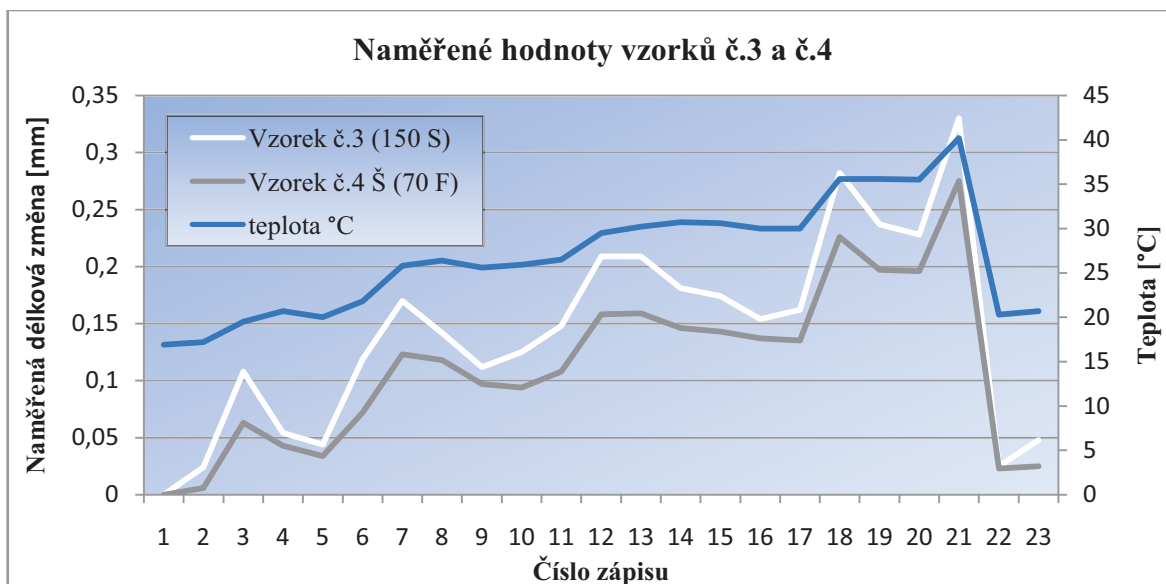
Graf 6 Průběhy indikovaných délek vzorků pěnového polystyrénu č. 1 a č. 2 v závislosti na teplotě.

Na grafu 6 si lze všimnout, jak reagují vzorky na postupné zvyšování teplot a následně na jejich ustálení.

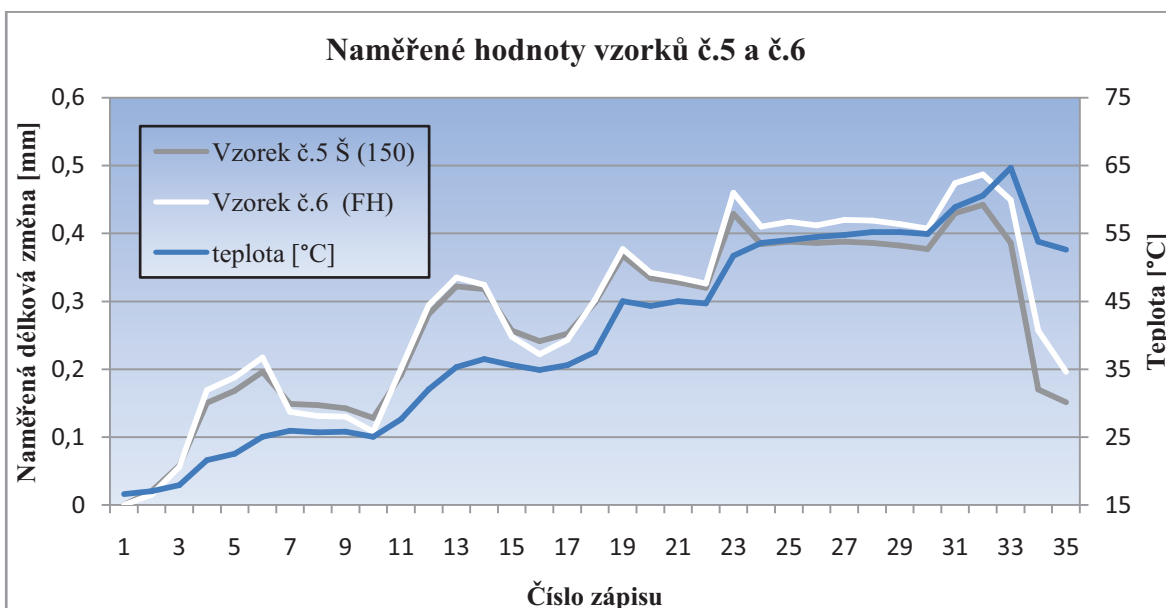


Graf 7 Průběh indikovaných délek vzorků pěnového polystyrénu č. 1 a č. 7 v závislosti na teplotě

Na průběhu délkových změn grafu 7 je patrná časová odezva vzorků pěnového polystyrénu na změnu teploty.



Graf 8 Průběh indikovaných délek vzorků pěnového polystyrénu č. 3 a č. 4 v závislosti na teplotě.



Graf 9 Průběh indikovaných délek vzorků pěnového polystyrénu č. 5 a č. 6 v závislosti na teplotě.

V grafech lze odvodit vývoj délkových změn v závislosti na teplotě. Vždy, když se jedná o výraznější změnu teploty, dochází k nárůstu délky. Po ustálení teploty dochází po určitém časovém intervalu i k ustálení délkové změny. Ihned po ustálení můžeme nastavit novou vyšší teplotu a pokračovat v měření.

Všechny naměřené hodnoty je nutné přepočítat na sledovanou délkovou změnu. Abychom tak mohli učinit, musíme nejprve provést kalibraci.

5 Kalibrace měřící komory

Z důvodu správnosti měření, je nutné provést kalibraci s materiálem o známé hodnotě součinitele teplotní délkové roztažnosti. Kalibrace byla provedena pomocí skleněných tyčinek z borosilikátového skla délky 25 cm o charakteristické hodnotě tepelné roztažnosti udávané výrobcem $\alpha = 5,1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [18].



Obr.16 *Vyobrazení vnitřního uspořádání měřící komory při kalibraci pomocí referenčních skleněných tyčinek*

Při vyhodnocení kontrakcí skleněných tyčinek došlo k tomu, žeoba délkové indikátory ukazovaly zápornou hodnotu, což odpovídá tomu, že se obě skleněné tyčinky při zahřátí smršťují. Ve skutečnosti jde o to, že spodní ocelový plech se při zahřátí roztahuje více než skleněná tyčinka, čímžje ve výsledku detekováno smrštění.

5.1 Formulace vztahu pro výpočet délkové teplotní roztažnosti

Pro vyjádření činitele délkové teplotní roztažnosti sledovaného vzorku penového polystyrenu jsem odvodit přepočítací vztah.

$$l_1 = l_2 - d_{ind} \quad (29)$$

Totožný vztah s podrobně rozepsanými součástmi, které se podílí na indikované veličině.

$$l_{1,1} \cdot (1 + \alpha_{1,1} \cdot \Delta\theta) = [l_{2,1}(1 + \alpha_{2,1} \cdot \Delta\theta) + l_{2,2}(1 + \alpha_{2,2} \cdot \Delta\theta) + l_{2,3}(1 + \alpha_{2,3} \cdot \Delta\theta)] - d_{ind} \quad (30)$$

Měřicí soustava je složena z více materiálů a jejich částí. Proto musíme všechny vlastnosti započítat do měření. Vzorec 17(30) sestává z $l_{1,1}$, což označuje délku spodní ocelové části, a z $l_{2,1}$ a $l_{2,3}$, což označuje délku prvků, které jsou v ose s měřeným vzorkem $l_{2,2}$. Každý materiál má odlišný součinitel délkové teplotní roztažnosti, a proto jelze dosadit.

$$\frac{l_{1,1} \cdot (1 + \alpha_{1,1} \cdot \Delta\theta) - l_{2,1}(1 + \alpha_{2,1} \cdot \Delta\theta) - l_{2,3}(1 + \alpha_{2,3} \cdot \Delta\theta) + d_{ind}}{l_{2,2}} = 1 + \alpha_{2,2} \cdot \Delta\theta \quad (31)$$

$$\alpha_{2,2} = \frac{\frac{l_{1,1} \cdot (1 + \alpha_{1,1} \cdot \Delta\theta) - l_{2,1}(1 + \alpha_{2,1} \cdot \Delta\theta) - l_{2,3}(1 + \alpha_{2,3} \cdot \Delta\theta) + d_{ind}}{l_{2,2}} - 1}{\Delta\theta} \quad (32)$$

kde je:

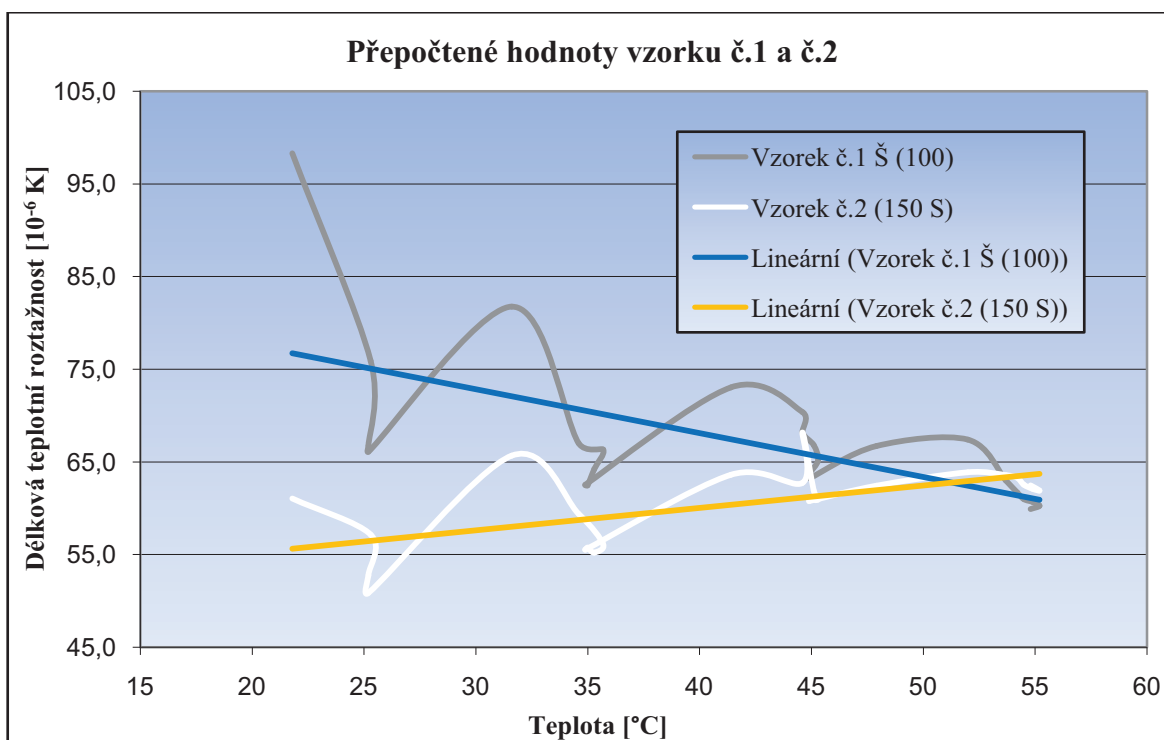
d_{ind}	naměřená hodnota pomocí tepelné komory [m],
$l_{1,1}$	délka spodní ocelové části [m],
$l_{2,1}$	délka skleněné tyčinky [m],
$l_{2,2}$	délka vzorku [m],
$l_{2,3}$	délka kovového hrotu úchylkoměru [m],
$\Delta\theta$	rozdíl teploty [°C],
$\alpha_{1,1}$	délková teplotní roztažnost spodní plechové části [1/K],
$\alpha_{2,1}$	délková teplotní roztažnost skleněné tyčinky [1/K],
$\alpha_{2,2}$	vypočtená délková teplotní roztažnost vzorku [1/K],
$\alpha_{2,3}$	délková teplotní roztažnost kovového hrotu úchylkoměru [1/K].



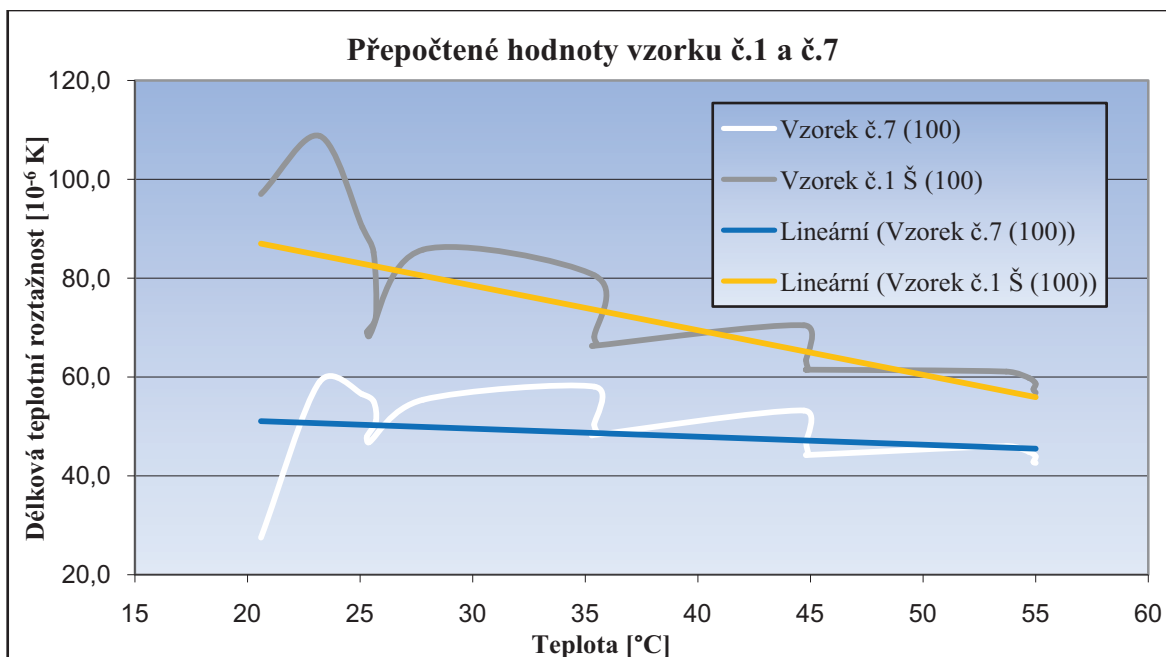
Obr.17 Schematické uspořádání jednotlivých součástí vyhřívané komory.

5.2 Přepoččet naměřených hodnot podle odvozeného vztahu

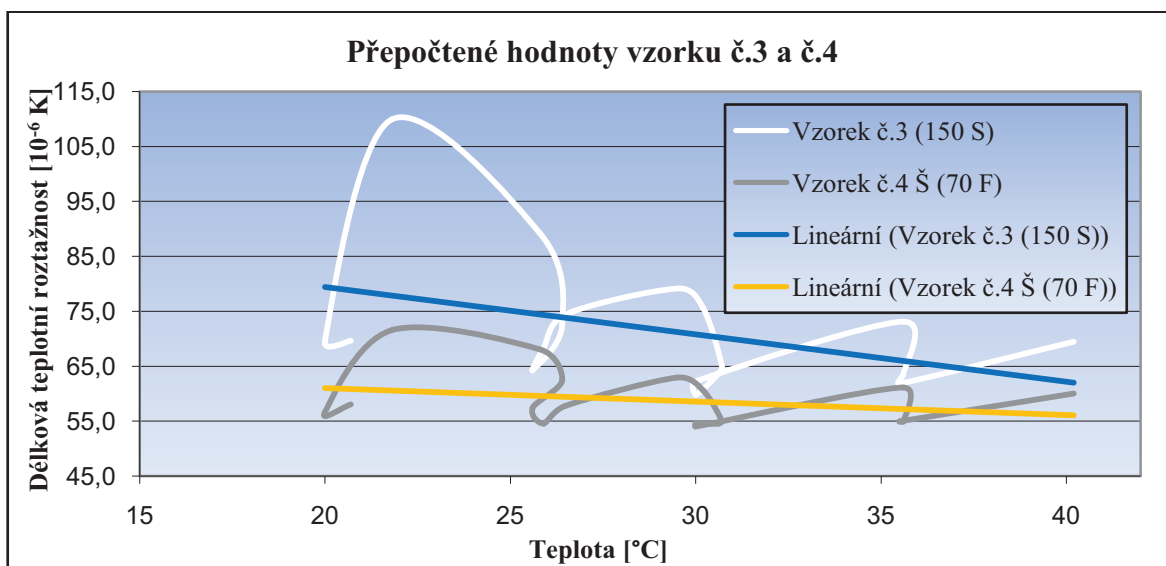
Použitím přepočítacího vztahu lze ze zjištěných délkových údajů vyjádřit sledovanou veličinu činitele délkové teplotní kontrakce. V následujících grafech 10, 11, 12 a 13 jsou uvedeny sledované veličiny v závislosti na teplotě. Na průbězích jsou vyobrazeny také přechodové stavy, které se vytváří během teplotního ustalování v komoře. Tyto hodnoty však neodpovídají ustálenému stavu, i když lze trendy průběhu α aproximovat lineární závislostí.

Graf 10 Graf závislosti činitele α vzorků pěnového polystyrénu č. 1 a 2 na teplotě.

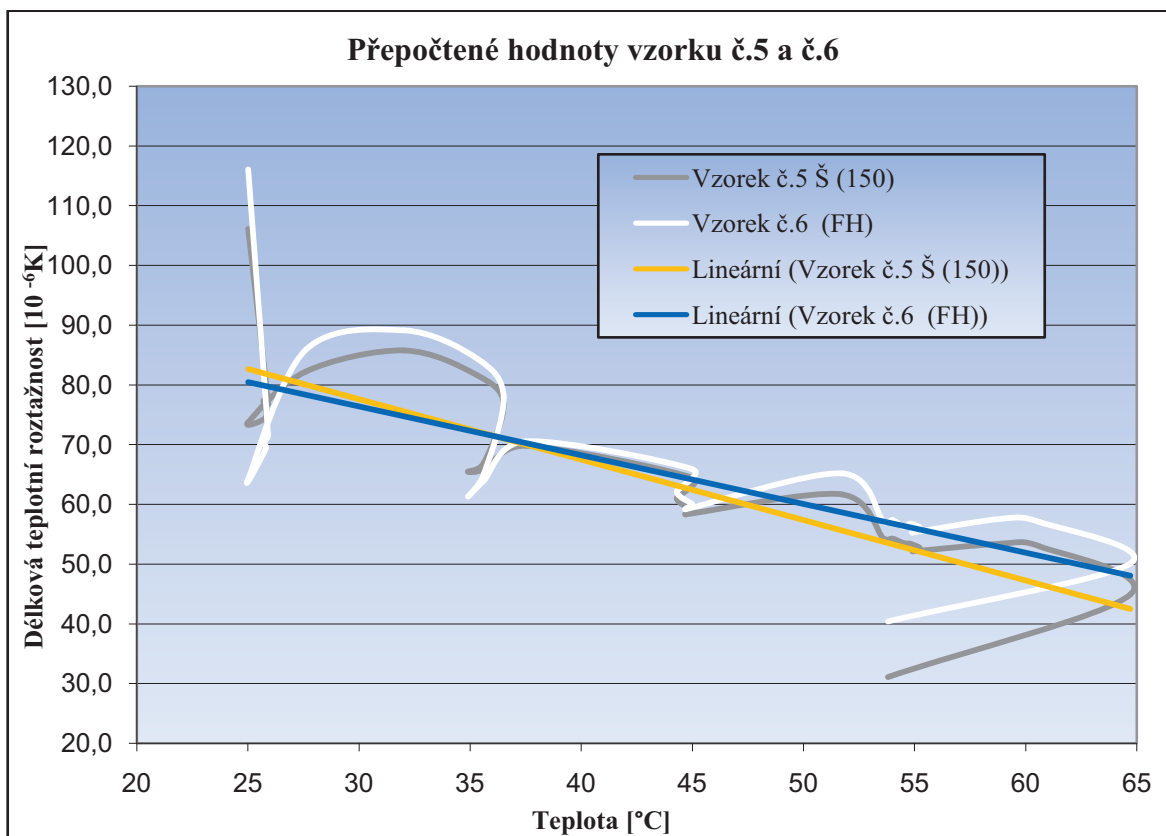
Nyní si můžete všimnout přepočítaných hodnot podle odvozeného vztahu, z grafu je patrný charakter lineární aproximace sledované teplotní kontrakce u obou vzorků.



Graf 11 Lineární průběh délkové teplotní roztažnosti vzorků č. 1 a 7 v závislosti na teplotě.

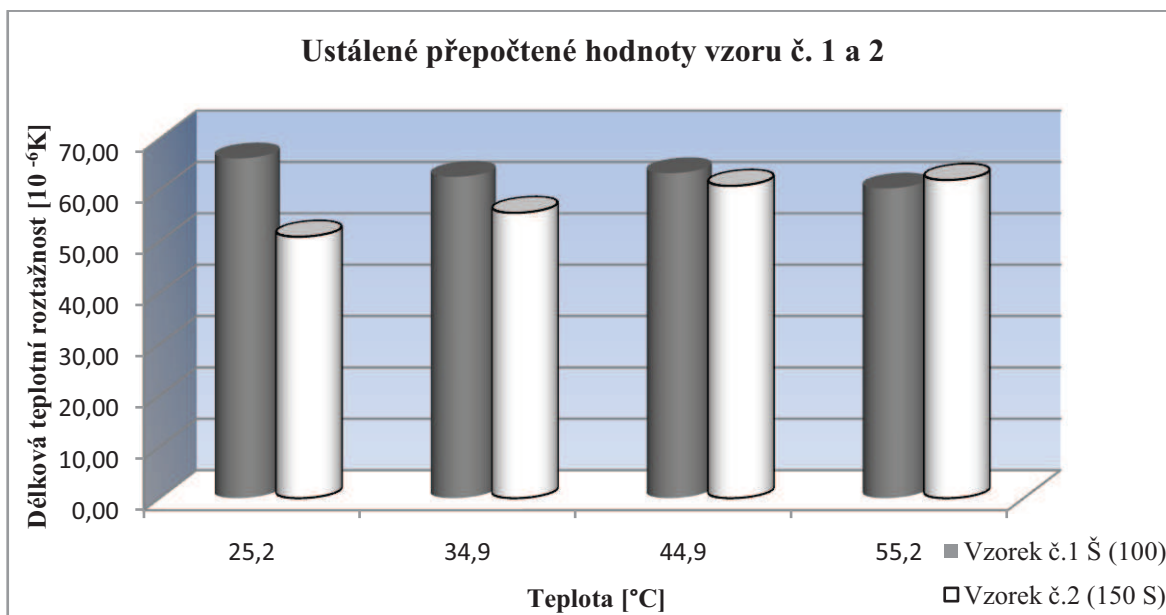


Graf 12 Lineární průběh délkové teplotní roztažnosti vzorků č. 3 a 4 v závislosti na teplotě.

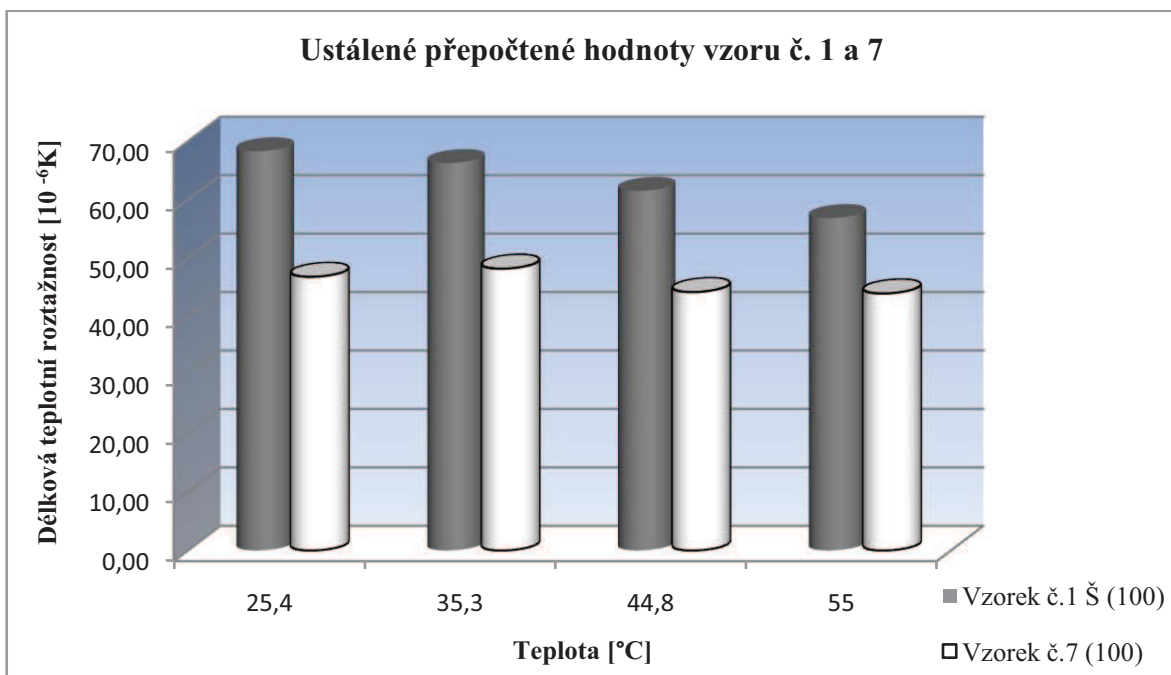


Graf 13 Lineární průběh délkové teplotní roztažnosti vzorků č. 5 a 6 v závislosti na teplotě.

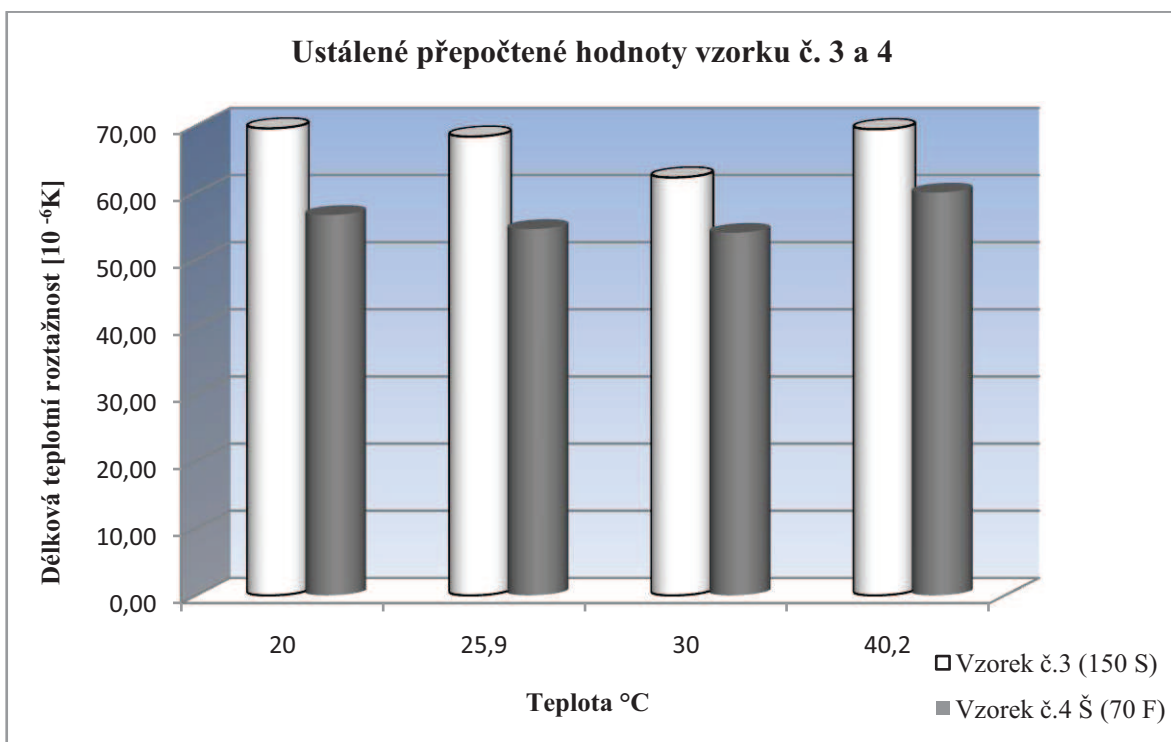
V grafu 13 lze vypožorovat průběhu lineární teplotní kontrakce, kde je patrný nárůst teploty a poté průběh po jejím ustálení. V následujících grafech 14, 15, 16 a 17 jsou vyobrazeny ustálené hodnoty v závislosti na teplotě.



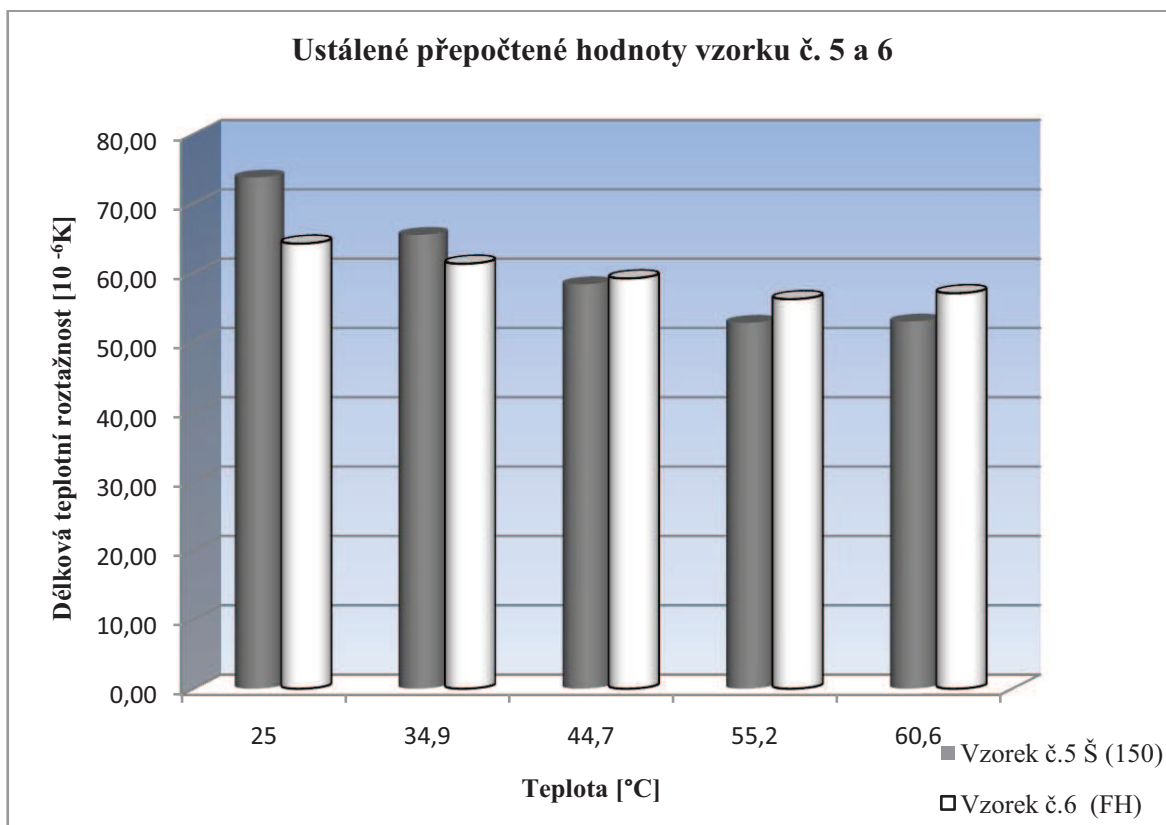
Graf 14 Ustálené hodnoty teplotní roztažnosti vzorků č. 1 a č. 2 pro vybrané teploty.



Graf 15 Ustálené hodnoty teplotní roztažnosti vzorků č. 1 a č. 7 pro vybrané teploty.



Graf 16 Ustálené hodnoty teplotní roztažnosti vzorků č. 3 a č. 4 pro vybrané teploty.



Graf 17 Ustálené hodnoty teplotní roztažnosti vzorků č. 5 a č. 6 pro vybrané teploty.

Na grafu 17 je patrný klesající průběh hodnot délkové teplotní kontrakce při vzrůstající teplotě po teplotním ustálení.

6 Měření objemové hmotnosti a součinitele teplotní vodivosti λ

V druhé části experimentování jsem se zabýval měřením tepelné vodivosti na vzorcích penového polystyrénu o rozměrech 300 mm x 300 mm x 50 mm. V té souvislosti jsem sledoval také objemovou hmotnost. Měření probíhalo v Laboratoři stavební fyziky na stacionárním deskovém přístroji HOLOMETRIX.

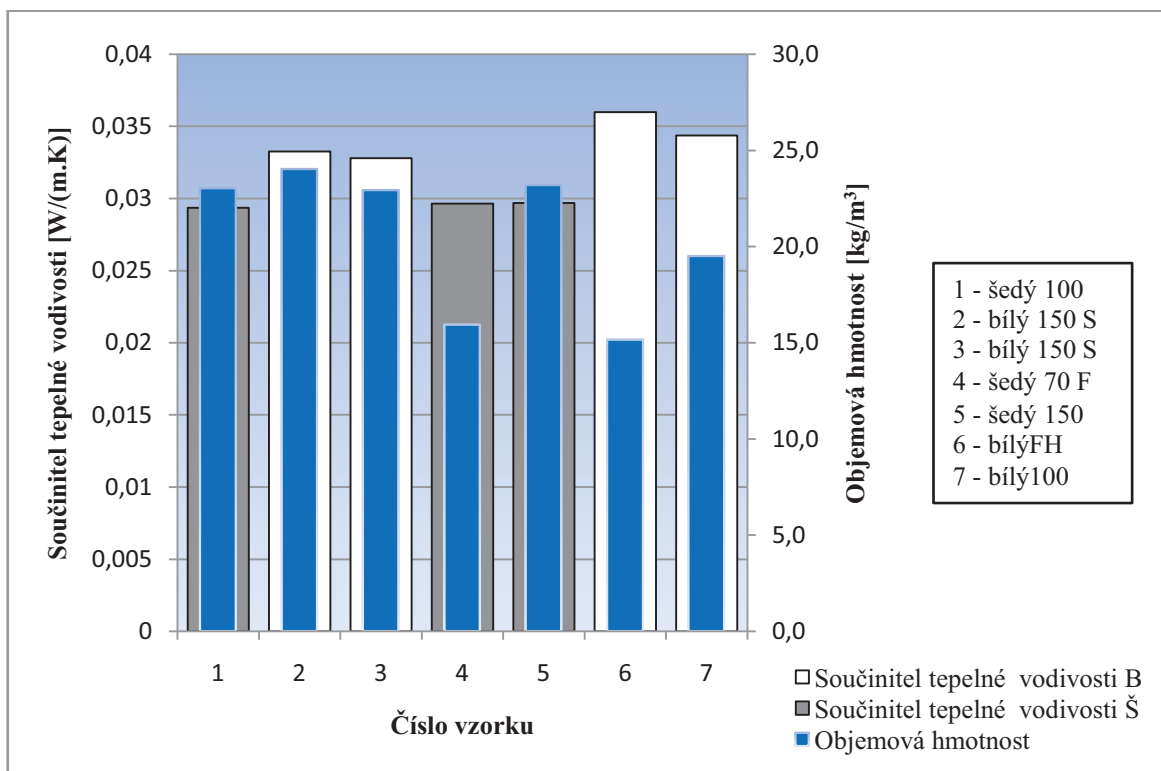
Před samotným měřením vzorek nebyl nijak upravován, pouze jsem ověřil rovinnost vzorku. Měření probíhalo na principu metody topné desky, kdy byla nastavena střední teplota +10°C a při teplotním spádu 10K. Vzorky byly měřeny ve vodorovné poloze s tepelným tokem shora dolů. Horní měřicí plocha desky měla teplotu +15°C a dolní +5°C. Průběh měřicího procesu je v přístroji řízen mikropočítačem, proměření každého vzorku trvalo asi 2 hodiny. Přehled zjištěných výsledků je uveden v tabulce 4.

6.1 Výstup měření

Tab.4 Přehled naměřených hodnot součinitele tepelné vodivosti pěnových polystyrénů a objemových hmotností.

vzorek č.	m [g]	d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	d ₃ [mm]	d ₄ [mm]	b ₁ [mm]	b ₂ [mm]	ρ [kg/m ³]	ρ _{stř} [kg/m ³]	λ [W/m.K]	λ _{stř} [W/m.K]
1	102,05	50,243	50,284	50,101	50,17	300	300	22,6		0,02932	
	102,19	50,235	50,376	50,592	50,506	300	300	22,5	23,0	0,02940	0,0293
	108,75	50,199	50,257	50,461	50,353	300	300	24,0		0,02932	
2	110,23	50,6	50,615	50,604	50,592	300	300	24,2		0,03328	
	110,15	50,851	50,768	50,704	50,727	300	300	24,1	24,0	0,03324	0,0333
	108,75	50,75	50,7	50,68	50,8	300	300	23,8		0,03326	
3	101,23	49,79	49,77	49,83	49,85	300,04	299,71	22,6		0,03277	
	102,48	49,77	49,71	49,7	49,83	299,93	300,04	22,9	22,9	0,03282	0,0328
	104,51	49,78	49,79	49,77	49,88	300,04	300,03	23,3		0,03279	
4	73,58	49,49	49,47	49,53	49,64	299,99	300,2	16,5		0,02944	
	69,61	49,82	49,86	49,73	49,59	300,35	300,05	15,5	16,0	0,02955	0,0296
	71,01	49,77	49,64	49,62	49,68	300,17	300,39	15,9		0,02996	
5	102,81	50,22	50,03	49,92	50,51	300,09	300,4	22,7		0,02928	
	106,61	49,98	50,06	49,92	49,98	300,01	300,13	23,7	23,2	0,02940	0,0297
	104,13	49,84	50,03	49,92	49,94	300,11	299,83	23,2		0,03039	
6	66,78	49,59	49,73	49,52	49,52	299,96	300	15,0		0,03570	
	67,71	49,5	49,59	49,48	49,56	299,82	299,83	15,2	15,2	0,03624	0,0360
	68,49	49,52	49,75	49,78	49,69	299,93	300,15	15,3		0,03605	
7	84,47	50,01	50,02	49,97	49,96	300,25	300,16	18,7		0,03433	
	88,77	49,88	50,09	50,08	50,01	299,83	300,1	19,7	19,5	0,03430	0,0344
	90,78	50,24	50,08	50,11	50,07	300,22	300,56	20,1		0,03447	

Z grafu 18 je patrné, že se vzorky pěnového polystyrénu vzájemně odlišují objemovou hmotností, která se u bílého pěnového polystyrénu pohybuje v rozmezí $\rho \in [15,2; 24,0]$ kg/m³, a u šedého pěnového polystyrénu nabývá v rozmezí $\rho \in [16,0; 23,2]$ kg/m³. Hodnoty součinitele tepelné vodivosti se zvyšují se objemovou hmotností u vzorků z bílého pěnového polystyrénu snižují. Všechny hodnoty se nachází v intervalu hodnot $\lambda \in [0,032; 0,036]$ W/(m.K). Jde o výsledky měření na tzv. vzduchosuchých vzorcích, které obsahují ustálené množství vlhkosti, jež koresponduje s okolní relativní vlhkostí vzduchu.



Graf 18 Zobrazení hodnot objemové hmotnosti a součinitele tepelné vodivosti.

Z grafu 18 je patrné, že se hodnoty součinitele tepelné vodivosti se zvyšující se objemovou hmotností u vzorků z bílého pěnového polystyrénu snižují. Všechny hodnoty se nachází v intervalu hodnot $\lambda \in [0,032; 0,036]$ W/(m.K). U vzorků šedého pěnového polystyrénu, který je modifikován koloidním grafitem, nabývají hodnoty součinitele tepelné vodivosti téměř konstantní hodnoty $\lambda \cong 0,029$ W/(m.K) bez ohledu na objemovou hmotnost.

V. Závěr

V teoretické části diplomní práce poskytuje přehled nejčastěji používaných tepelných izolací u nás. Celá kapitola je rozdělena na podkapitoly, kde jsou jednotlivé izolace rozčleněny do kategorií. Nejprve jsou uvedeny lehké silikátové hmoty, liapor, perlit, lehký beton z těchto materiálů nebo rozšířený pórobeton. Pórobeton, jakožto nejrozšířenější konstrukční stavivo u nás, patří v této kategorii mezi staviva s vlastností tepelné izolace. V kapitole o pěnových anorganických hmotách se jedná o pěnové sklo, což v praxi není moc rozšířené z důvodu vysoké ceny. V další kapitole práce se věnuji pěnovým organickým hmotám. Mezi nejznámější zástupce se do této skupiny řadí extrudovaný polystyrén, pěnový polyuretan a pěnový polystyrén. Extrudovaný polystyrén vyniká především velmi dobrou pevností v tlaku. Tato vlastnost se často uplatní například pro tepelné izolace, které jsou více zatíženy. Pěnový polyuretan vykazuje vyšší energetickou náročnost při výrobě, ale zato velmi nízký součinitel teplotní vodivosti.

V praktické části se diplomová práce zabývá problematikou měření vybraných fyzikálních vlastností na vzorcích pěnového polystyrénu. Zejména jsou sledovány veličiny objemové hmotnosti, součinitele tepelné vodivosti a délkové teplotní roztažnosti. Součinitel tepelné vodivosti byl v Laboratoři stavební fyziky stanoven na stacionárním deskovém přístroji HOLOMETRIX, pro měření délkové teplotní roztažnosti bylo nezbytné vyvinout metodiku měření a sestavit vhodné měřicí zařízení. K tomu je v praktické části práce uveden konstrukční návrh vyhřívané komory, výpočet tepelných poměrů, odvození činitele teplotní kontrakce z indikované veličiny a ověřovací kalibrační měření na referenčním materiálu. Vývoj, sestavení a kalibrace vyhřívané komory představuje prototypové zařízení určené pro měření délkové teplotní kontrakce vzorků vypěněných plastů, u nichž je respektována nízká tuhost zkoušeného materiálu. V tomto prototypovém provedení nebyl formulován požadavek na automatizaci měřicího procesu, proto se teplota termostatu nastavuje ručně, také se údaje na délkových indikátorech odečítají ručně do tabulkového přehledu.

Prokazuje se, že pěnový polystyrén s přídavkem koloidního grafitu vykazuje větší teplotní kontrakci oproti pěnovému polystyrénu bílému bez přísad. To způsobuje nestandardní projevy při použití tohoto pěnového polystyrénu v zateplovacím systému ETICS. V rámci studia vlastností bylo proměřeno celkem sedm různých vzorků pěnového polystyrénu, z nichž některé byly modifikovány přídavkem koloidního grafitu. Vzorky se lišily svou objemovou hmotností, která souvisí s množstvím přidaných modifikujících látek. Vzorky

pro stanovení součinitele tepelné vodivosti a délkové teplotní kontrakce byly připraveny výrobcem pěnového polystyrénu s označením čísla č. 1 až č. 7.

V první etapě praktické části jsem sestavil strojový simulační program SCHMIDT. Při tvorbě tohoto programu se vycházelo z funkce IGLOB, kterou jsem simuloval intenzitu oslunění na zvolený povrch stěny. Program byl vyzkoušen na operačních systémech Windows XP a Win 7 a pracuje bez problému. Během jeho vývoje jsem upřesnil podmínky ohledně reálného oslunění povrchu stěny s libovolnou geometrií umístění z hlediska dopadu slunečního záření.

V průběhu ověřování simulačního programu bylo zjištěno značné zpomalování programu, pokud se při zadávání vstupních hodnot použijí nízké hodnoty tepelné kapacity materiálu, například vzduchu ve vzduchové dutině. Jisté zpomalení běhu programu je závislé na vstupních hodnotách materiálů skladebných vrstev stěny. Snaha vyčíslit podmínky šíření tepla v nehomogenní materiálové vrstvě, kterou představují „bochánky“ pojivové složky izolačních desek v souvrství zateplovacího systému, formou prostorového uspořádání výpočtového modelu však bylo nad rámec zadání mé diplomové práce.

Výstupem programu SCHMIDT jsou vykreslené grafy teplotních průběhů, které zobrazují nestacionární průběhy teplot ve zvolené stěnové konstrukci pro stanovené časy. Pokud se do vstupních hodnot zadá stěnová konstrukce, kde součet tloušťek vrstev přesahuje 0,45 m, křivky se vykreslují mimo oblast souřadnic grafu. Proto je nutné v programu modifikovat příslušné deklarační parametry.

Po vykreslení grafů teplotních průběhů v různých letních dnech jsem zjistil, že nejvyšší teplota na povrchu konstrukce nastává dne 21.6. Proto bylo dále počítáno s hodnotami tohoto dne jako s nejvyššími letními údaji. Povrchové teploty na vnějším povrchu stěny dosahovaly ve výpočtech téměř 65°C. Tohoto údaje bylo využito pro vymezení teplotního intervalu při měření délkové teplotní roztažnosti vzorků pěnového polystyrénu ve vyhřívané komoře.

Vyhřívaná komora je zhotovena z plechu o tloušťce 2mm a sestává ze dvou částí. První část slouží pro uchycení vzorků a délkových indikátorů. Druhá část funguje jako víko a zároveň jako topné těleso, což zajišťuje 10 m topného odporového drátu. Tento drát je navinutý v meandru a je napájen ze stabilizovaného počítačového zdroje. Regulaci teploty uvnitř komory zajišťuje teplotní regulátor, který spíná počítačový zdroj. Pro ustálení

nastavené teploty v komoře je potřebné ji dostatečně zaizolovat. Tuto izolaci tvoří podlahový polystyren s kaširováním hliníkovou fólií o tloušťce 30mm.

Pro ověření funkční schopnosti i přesnosti měření délkové teplotní roztažnosti ve vyhřívané komoře jsem zvolil materiál o známé délkové teplotní roztažnosti. Podle údajů výrobce tyčinky z borosilátového skla byla uváděna hodnota délkové teplotní roztažnosti $5,1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, kterou jsem ověřil.

Prokázal jsem, že sestavené jednoduché prototypové zařízení vyhřívané komory poskytuje dostatečnou možnost pro stanovení součinitele délkové roztažnosti vzorků z pěnového polystyrénu. Zařízení poskytuje potřebnou stabilitu, snadnou manipulovatelnost i přiměřenou cenovou náročnost.

Jak už bylo zmiňováno výše, šedý pěnový polystyrén vykazuje délkovou kontrakci větší. V grafech 14 a 17 se prokazuje, že u vzorků šedého pěnového polystyrénu, který byl modifikovaný koloidním grafitem, vychází činitel délkové roztažnosti větší než u vzorku bílého pěnového polystyrenu. Při zvyšující se teplotě se hodnota délkové teplotní roztažnosti snižuje, což bylo prokázáno několika měřeními.

Při měření teplotní délkové roztažnosti bylo prokázáno, že vzorky bílého pěnového polystyrenu mají teplotní délkovou kontrakci větší než vzorky šedého pěnového polystyrénu. Z hlediska provádění montáže izolačních desek zateplovacího systému ETICS tak vystává riziko z vyšší délkové teplotní roztažnosti u šedého pěnového polystyrénu při oslunění než u bílého pěnového polystyrénu. Konkrétní hodnoty délkové teplotní kontrakce se při teplotě $+25^{\circ}\text{C}$ pohybují u bílého polystyrénu, vzorky označené 2 – bílý 150S, 3 – bílý 150S, 6 – bílý FH a 7 – bílý 100, v rozmezí $46 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ až $68 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, u šedého polystyrénu v rozmezí $56 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ až $68 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, vzorky označené 1 – šedý 100, 4 – šedý 70F, a u vzorku označeném č. 5 – šedý 150, hodnota $73 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. S přibývajícím teplotou se rozdíly mezi oběma druhy pěnového polystyrénu vzájemně vyrovnávají jak je patrné v grafu 14 a 17. S přibývajícím teplotou se hodnoty teplotní kontrakce snižují, při teplotě asi 60°C tento pokles činí až 11 % u bílého polystyrénu a až 29 % u vzorků šedého polystyrénu.

Simulačním programem jsem dokázal, že teploty způsobené osluněním na rozhraní mezi izolační deskami a podkladem nejsou příliš zvýšené a nemohou tak mít takový účinek, který se očekával v souvislosti poruchy soudržnosti s podkladem. Připouštím, že u stěnových konstrukcí, které jsou orientovány jižním směrem, by k tomu projevu mohlo při přímém oslunění docházet.

VI. Seznam použitých zdrojů

- [1] Tobolka, Z. *Materiály pro stavební izolace*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 1994. ISBN 80-01-00924-6.
- [2] Drochytka, R.; Matulova, P. *Lehké stavební látky*. Brno, 2006.
- [3] Tepelné izolace. *Stavebnictví 3000*. [Online] 1. 10 2012. [Citace: 9. 12 2012.] <http://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/tepelne-izolace-prehled-materialy-druhy-zpusoby-po/>.
- [4] Pasivní domy - tepelné izolace. *Pasivní domy*. [Online] [Citace: 20. 12 2012.] <http://www.pasivnidomy.cz/tepelna-ochrana/tepelne-izolace.html?chapter=typy-tepelnych-izolaci>.
- [5] Drochytka, R. *Plastické látky*. Brno : VUT Brno, 2007.
- [6] Izolační materiály. *Izolace-info*. [Online] [Citace: 9. 12 2012.] <http://www.izolace-info.cz/katalog/foukana-a-sypka-izolace/materialy-na-bazi-papiru-a-celulozy/>.
- [7] Zach, J. *Speciální izolace*. Brno : VUT Brno, 2006.
- [8] Vazníky DNK. *Typy tepelných izolací*. [Online] 2008. [Citace: 9. 12 2012.] <http://www.drevene-vazniky.info/typy-tepelnych-izolaci/>.
- [9] ČR, Sdružení EPS. Vlastnosti expandovaného polystyrenu. *Sdružení EPS*. [Online] 13. 4 2012. [Citace: 10. 12 2012.] http://www.epscr.cz/obj/232/Izolacni_praxe_1.pdf.
- [10] Polystyren. [Online] [Citace: 21. 12 2012.] <http://www.stavebnipolystyren.cz/>.
- [11] Kašík, B a Karásek, B. *Polystyrénové plasty*. místo neznámé : Institut pro výchovu vědeckých pracovníků Ministerstva průmyslu ČSR, 1982.
- [12] Halahyja, M. *Stavebná tepelná technika, akustika a osvetlenie*. Bratislava : ALFA, 1985.
- [13] Vaverka, J. *Stavební tepelná technika a energetika budov*. Brno : Nakladatelství VUTIUM, 2006. ISBN 80-214-2910-0.
- [14] Šťastník, S. *Problémy šíření tepla a vlhkosti ve stavebních látkách*. Brno : VUTIUM, 2009. ISBN 978-80-214-3907-8.
- [15] Šťastník, S. *Fyzika stavebních látek*. Brno : VUT Brno, 2009.

- [16] 2.2 PLANCKŮV VYZAŘOVACÍ ZÁKON. *Fakulta strojního inženýrství*. [Online]
[Citace: 19. 12 2013.] <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/0202.htm>.
- [17] 30.Absolutně černé těleso Planckův vyzařovací zákon,. *Aldebaran*. [Online]
[Citace: 20. 12 2012.] <http://aldebaran.cz/~blahova/F1KME/30.pdf>.
- [18] Vlastnosti skla. *Verkon*. [Online] 2009 - 2013. [Citace: 2012. 12 28.]
<http://www.verkon.cz/vlastnosti-skla/>.
- [19] Halahyja, M.*Stavebná tepelná, osvetlenie a akustika*. Bratislava : Alfa, 1970.

TECHNICKÉ NORMY

ČSN EN 12602 (731221)*Prefabrikované vyztužené dílce z autoklávovaného pórobetonu*,
Evropský výbor pro normalizaci, 2008

ČSN EN 72 7012 -1*Stanovení součinitele tepelné vodivosti materiálů v ustáleném tepelném stavu- Metoda desky Část 1: Společná ustanovení*, Český normalizační institut Praha, 1993

ČSN EN 72 7012 -2 *Stanovení součinitele tepelné vodivosti materiálů v ustáleném tepelném stavu- Metoda desky Část 2: Metoda chráněné teplé desky*, Český normalizační institut Praha, 1993

ČSN EN 72 7012 -3*Stanovení součinitele tepelné vodivosti materiálů v ustáleném tepelném stavu- Metoda desky Část 3: Metoda měřidla tepelného toku*, Český normalizační institut Praha, 1993

Seznam použitých zkratk a symbolů

č.	číslo
tab.	tabulka
obr.	obrázek
tzv.	takzvaně
např.	například